Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

NORMA BRASILEIRA

ABNT NBR 5419-1

Primeira edição
22.05.2015

Válida a partir de
22.06.2015

Proteção contra descargas atmosféricas
Parte 1: Princípios gerais

Lightning protection
Part 1: General principles

ICS 91.120.40

ISBN 978-85-07-05501-3

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS

Número de referência
ABNT NBR 5419-1:2015
67 páginas

© ABNT 2015

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2015
Todos os direitos reservados. A menos que especificado de outro modo, nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida ou utilizada por qualquer meio, eletrônico ou mecânico, incluindo fotocópia e microfilme, sem permissão por escrito da ABNT.

ABNT
Av.Treze de Maio, 13 - 28º andar
20031-901 - Rio de Janeiro - RJ
Tel.: + 55 21 3974-2300
Fax: + 55 21 3974-2346
abnt@abnt.org.br
www.abnt.org.br

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Sumário

Página

Prefácio vii
Introdução ix
1 Escopo 1
2 Referências normativas 1
3 Termos e definições 2
4 Parâmetros da corrente da descarga atmosférica 8
5 Danos devido às descargas atmosféricas 8
5.1 Danos à estrutura 8
5.1.1 Efeitos das descargas atmosféricas sobre uma estrutura 9
5.1.2 Fontes e tipos de danos a uma estrutura 10
5.2 Tipos de perdas 11
6 Necessidade e vantagem econômica da proteção contra descargas atmosféricas 13
6.1 Necessidade da proteção contra descargas atmosféricas 13
6.2 Vantagem econômica da proteção contra descargas atmosféricas 14
7 Medidas de proteção 14
7.1 Geral 14
7.2 Medidas de proteção para reduzir danos a pessoas devido a choque elétrico 14
7.3 Medidas de proteção para redução de danos físicos 15
7.4 Medidas de proteção para redução de falhas dos sistemas elétricos e eletrônicos 15
7.5 Escolha das medidas de proteção 15
8 Critérios básicos para proteção de estruturas 16
8.1 Geral 16
8.2 Níveis de proteção contra descargas atmosféricas (NP) 16
8.3 Zonas de proteção contra descarga atmosférica “raio” (ZPR) 18
8.4 Proteção de estruturas 21
8.4.1 Proteção para reduzir danos físicos e risco de vida 21
8.4.2 Proteção para reduzir as falhas de sistemas internos 22
Anexo A (informativo) **Parâmetros da corrente das descargas atmosféricas** 24
A.1 Descarga atmosférica para a terra 24
A.2 Parâmetros da corrente da descarga atmosférica 27
A.3 Estabelecendo os parâmetros máximos da corrente de descarga atmosférica para o nível de proteção NP I 30
A.3.1 Impulso positivo 30
A.3.2 Impulso positivo e componente longa 31
A.3.3 Primeiro impulso negativo 31
A.3.4 Impulso subsequente 32
A.4 Estabelecendo os parâmetros mínimos da corrente das descargas atmosféricas 32
Anexo B (informativo) **Equação da corrente da descarga atmosférica em função do tempo para efeito de análise** 34

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Anexo C (informativo) **Simulação da corrente da descarga atmosférica com a finalidade de ensaios** 39
C.1 Geral 39
C.2 Simulação da energia específica do primeiro impulso positivo e da carga da componente longa 39
C.3 Simulação da taxa de variação da frente de onda de corrente dos impulsos 40
Anexo D (informativo) **Parâmetros de ensaio para simular os efeitos da descarga atmosférica sobre os componentes do SPDA** 43
D.1 Geral 43
D.2 Parâmetros de corrente relevantes ao ponto de impacto 43
D.3 Distribuição da corrente 46
D.4 Efeitos da corrente da descarga atmosférica e possíveis danos 47
D.4.1 Efeitos térmicos 47
D.4.1.1 Aquecimento resistivo 47
D.4.1.2 Danos térmicos no ponto de impacto 49
D.4.2 Efeitos mecânicos 50
D.4.2.1 Interação magnética 50
D.4.2.2 Danos devido às ondas de choque acústicas 53
D.4.3 Efeitos combinados 53
D.4.4 Centelhamento 53
D.5 Componentes do SPDA, problemas relevantes e parâmetros de ensaios 53
D.5.1 Geral 53
D.5.2 Captação 54
D.5.3 Descidas 54
D.5.3.1 Aquecimento resistivo 54
D.5.3.2 Efeitos mecânicos 55
D.5.3.3 Componentes de conexão 56
D.5.3.4 Aterramento 56
D.6 Dispositivo de proteção contra surtos (DPS) 57
D.6.1 Geral 57
D.6.2 DPS contendo centelhadores 57
D.6.3 DPS contendo varistores de óxido metálico 57
D.7 Resumo dos parâmetros de ensaios a serem adotados nos ensaios de componentes de SPDA 58
Anexo E (informativo) **Surtos devido às descargas atmosféricas em diferentes pontos da instalação** 59
E.1 Visão geral 59
E.2 Surtos devido às descargas atmosféricas na estrutura (fonte de danos S1) 59
E.2.1 Surtos fluindo por meio de partes condutoras externas e linhas conectadas à estrutura 59
E.2.2 Fatores que influenciam a divisão da corrente da descarga atmosférica em linhas de energia 61
E.3 Surtos pertinentes às linhas conectadas à estrutura 62

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

E.3.1 Surtos devido às descargas atmosféricas nas linhas (fonte de danos S3) 62
E.3.2 Surtos devido às descargas atmosféricas próximas às linhas (fonte de danos S4) 63
E.4 Surtos devido aos efeitos de indução (fontes de danos S1 ou S2) 64
E.4.1 Geral 64
E.4.2 Surtos dentro de uma ZPR 1 não blindada 64
E.4.3 Surtos dentro de ZPR blindadas 64
E.5 Informações gerais relativas aos DPS 64
Bibliografia 66

Figuras

Figura 1 – Conexões entre as partes da ABNT NBR 5419 ix
Figura 2 – Tipos de perdas e riscos correspondentes que resultam de diferentes tipos de danos 13
Figura 3 – ZPR definidas por um SPDA (ABNT NBR 5419-3) 20
Figura 4 – ZPR definidas por MPS (ABNT NBR 5419-4) 21
Figura A.1 – Definições dos parâmetros de um impulso de corrente (tipicamente T_2 < 2 ms) 24
Figura A.2 – Definições dos parâmetros da componente longa (tipicamente 2 ms < T_{longa} < 1 s) 25
Figura A.3 – Possíveis componentes de descargas atmosféricas descendentes (típicas em locais planos e em estruturas baixas) 25
Figura A.4 – Possíveis componentes de descargas atmosféricas ascendentes (típicas de estruturas mais altas ou expostas) 26
Figura A.5 – Distribuição cumulativa de frequência dos parâmetros das correntes das descargas atmosféricas (linhas com valores de 95 % a 5 %) 30
Figura B.1 – Forma de onda da elevação da corrente do primeiro impulso positivo 35
Figura B.2 – Forma de onda da cauda da corrente do primeiro impulso positivo 35
Figura B.3 – Forma de onda da elevação da corrente do primeiro impulso negativo 36
Figura B.4 – Forma de onda da cauda da corrente do primeiro impulso negativo 36
Figura B.5 – Forma de onda da elevação da corrente do impulso negativo subsequente 37
Figura B.6 – Forma de onda da cauda da corrente do impulso negativo subsequente 37
Figura B.7 – Densidade da amplitude da corrente da descarga atmosférica de acordo com o NP I 38
Figura C.1 – Exemplo de gerador de ensaio para simulação da energia específica do primeiro impulso positivo e da carga da componente longa 40
Figura C.2 – Definição para a taxa de variação da corrente de acordo com a Tabela C.3 41
Figura C.3 – Exemplo de gerador de ensaio para a simulação da taxa de variação da frente de onda do primeiro impulso positivo para itens sob ensaio de grande porte 42
Figura C.4 – Exemplo de gerador de ensaio para a simulação da taxa de variação da frente de onda dos impulsos subsequentes negativos para itens sob ensaio de grande porte 42
Figura D.1 – Arranjo geral de dois condutores para o cálculo da força eletrodinâmica 51

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Figura D.2 – Arranjo de condutor típico em um SPDA 51
Figura D.3 – Diagrama de esforços *F* para a configuração da Figura D.2 52
Figura D.4 – Força por unidade de comprimento *F'* ao longo do condutor horizontal da Figura D.2 52

Tabelas

Tabela 1 – Efeitos das descargas atmosféricas nos vários tipos de estruturas 9
Tabela 2 – Danos e perdas relevantes para uma estrutura para diferentes pontos de impacto da descarga atmosférica 12
Tabela 3 – Valores máximos dos parâmetros das descargas atmosféricas correspondentes aos níveis de proteção (NP) 17
Tabela 4 – Valores mínimos dos parâmetros das descargas atmosféricas e respectivos raios da esfera rolante, correspondentes aos níveis de proteção (NP) 18
Tabela 5 – Probabilidades para os limites dos parâmetros das correntes das descargas atmosféricas 18
Tabela A.1 – Valores tabulados dos parâmetros da corrente das descargas atmosféricas obtidos do CIGRE (Electra No. 41 ou No. 69*) [20], [21] 27
Tabela A.2 – Distribuição logarítmica normal dos parâmetros da corrente das descargas atmosféricas – Média μ e dispersão $\sigma_{\log}$ calculados para 95 % e 5 % dos valores a partir do CIGRE (Electra No. 41 ou No. 69) [20], [21] 28
Tabela A.3 – Valores da probabilidade *P* em função da corrente *I* da descarga atmosférica 29
Tabela B.1 – Parâmetros para a equação B.1 34
Tabela C.1 – Parâmetros de ensaios para o primeiro impulso positivo 40
Tabela C.2 – Parâmetros de ensaios para a componente longa 40
Tabela C.3 – Parâmetros de ensaios dos impulsos 41
Tabela D.1 – Resumo dos parâmetros da descarga atmosférica a serem considerados nos cálculos dos valores de ensaio para diferentes componentes do SPDA e para diferentes níveis de proteção 44
Tabela D.2 – Características físicas de materiais típicos utilizados em componentes de SPDA 48
Tabela D.3 – Elevação de temperatura para condutores de diferentes seções em função de *W/R* 48
Tabela E.1 – Valores de impedâncias convencionais de aterramento *Z* e Z_1 de acordo com a resistividade do solo 61
Tabela E.2 – Surtos de correntes devido às descargas atmosféricas previstos em sistemas de baixa tensão 62
Tabela E.3 – Surtos de correntes devido às descargas atmosféricas previstos em sistemas de sinais 63

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Prefácio

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é o Foro Nacional de Normalização. As Normas Brasileiras, cujo conteúdo é de responsabilidade dos Comitês Brasileiros (ABNT/CB), dos Organismos de Normalização Setorial (ABNT/ONS) e das Comissões de Estudo Especiais (ABNT/CEE), são elaboradas por Comissões de Estudo (CE), formadas pelas partes interessadas no tema objeto da normalização.

Os Documentos Técnicos ABNT são elaborados conforme as regras da Diretiva ABNT, Parte 2.

A ABNT chama a atenção para que, apesar de ter sido solicitada manifestação sobre eventuais direitos de patentes durante a Consulta Nacional, estes podem ocorrer e devem ser comunicados à ABNT a qualquer momento (Lei nº 9.279, de 14 de maio de 1996).

Ressalta-se que Normas Brasileiras podem ser objeto de citação em Regulamentos Técnicos. Nestes casos, os Órgãos responsáveis pelos Regulamentos Técnicos podem determinar outras datas para exigência dos requisitos desta Norma, independentemente de sua data de entrada em vigor.

A ABNT NBR 5419-1 foi elaborada no Comitê Brasileiro de Eletricidade (ABNT/CB-03), pela Comissão de Estudo de Proteção contra Descargas Atmosféricas (CE-03:064.10). O Projeto circulou em Consulta Nacional conforme Edital nº 08, de 12.08.2014 a 10.12.2014, com o número de Projeto 03:064.10-100/1.

Esta parte da ABNT NBR 5419 e as ABNT NBR 5419-2 , ABNT NBR 5419-3 e ABNT NBR 5419-4 cancelam e substituem a ABNT NBR 5419:2005.

As instalações elétricas cobertas pela ABNT NBR 5419 estão sujeitas também, naquilo que for pertinente, às normas para fornecimento de energia estabelecidas pelas autoridades reguladoras e pelas empresas distribuidoras de eletricidade.

A ABNT NBR 5419, sob o título geral "*Proteção contra descargas atmosféricas",* tem previsão de conter as seguintes partes:

— Parte 1: Princípios gerais;

— Parte 2: Gerenciamento de risco*;*

— Parte 3: Danos físicos a estruturas e perigos à vida

— Parte 4: Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura

O Escopo desta Norma Brasileira em inglês é o seguinte:

Scope

This part of ABNT NBR 5419 establishes the requirements for lightning protection determination.

This part of ABNT NBR 5419 provides grants for use in projects of lightning protection.

The applicability of this part of ABNT NBR 5419 may have restrictions specially in human life protection when it is based on indirect effects of lightning

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

This part of ABNT NBR 5419 does not apply on Railway systems; Vehicles, aircraft, ships and offshore platforms; High pressure underground pipes; Pipes and supply lines and telecommunications placed outside of the structure.

NOTE Usually these systems comply with the special regulations established by specific authorities.

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Introdução

Não há dispositivos ou métodos capazes de modificar os fenômenos climáticos naturais a ponto de se prevenir a ocorrência de descargas atmosféricas. As descargas atmosféricas que atingem estruturas (ou linhas elétricas e tubulações metálicas que adentram nas estruturas) ou que atingem a terra em suas proximidades são perigosas às pessoas, às próprias estruturas, seus conteúdos e instalações. Portanto, medidas de proteção contra descargas atmosféricas devem ser consideradas.

A necessidade de proteção, os benefícios econômicos da instalação de medidas de proteção e a escolha das medidas adequadas de proteção devem ser determinados em termos do gerenciamento de risco. O método de gerenciamento de risco está contido na ABNT NBR 5419-2.

As medidas de proteções consideradas na ABNT NBR 5419 são comprovadamente eficazes na redução dos riscos associados às descargas atmosféricas.

Todas as medidas de proteção contra descargas atmosféricas formam a proteção completa contra descargas atmosféricas. Por razões práticas, os critérios para projeto, instalação e manutenção das medidas de proteção são considerados em dois grupos separados:

— o primeiro grupo se refere às medidas de proteção para reduzir danos físicos e riscos à vida dentro de uma estrutura e está contido na ABNT NBR 5419-3;

— o segundo grupo se refere às medidas de proteção para reduzir falhas de sistemas elétricos e eletrônicos em uma estrutura e está contido no ABNT NBR 5419-4.

As conexões entre as partes da ABNT NBR 5419 são ilustradas na Figura 1.

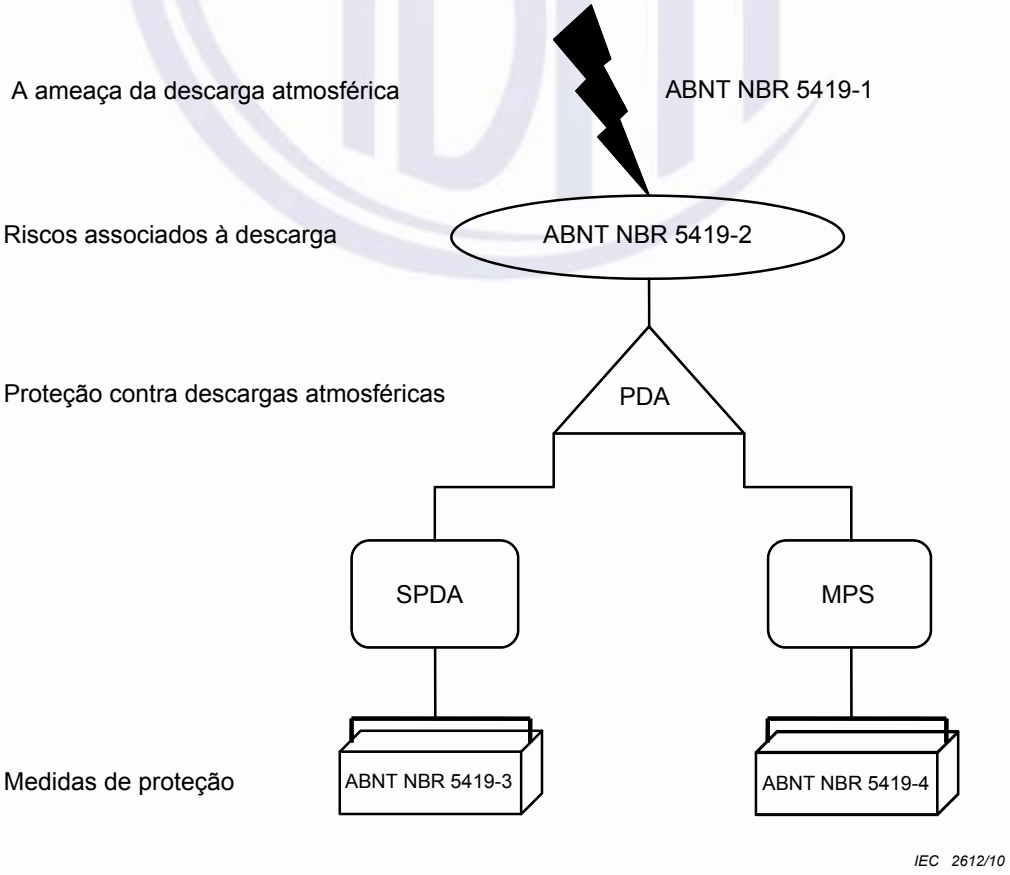


Figura 1 – Conexões entre as partes da ABNT NBR 5419

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Proteção contra descargas atmosféricas
Parte 1: Principios gerais

1 Escopo

Esta Parte da ABNT NBR 5419 estabelece os requisitos para a determinação de proteção contra descargas atmosféricas.

Esta Parte da ABNT NBR 5419 fornece subsídios para o uso em projetos de proteção contra descargas atmosféricas.

A aplicabilidade desta Parte da ABNT NBR 5419 pode ter restrições especialmente na proteção da vida humana quando for baseada em efeitos indiretos de descargas atmosféricas.

Esta Parte da ABNT NBR 5419 não se aplica a sistemas ferroviários; veículos, aviões, navios e plataformas *offshore*, tubulações subterrâneas de alta pressão, tubulações e linhas de energia e de sinal colocados fora da estrutura.

NOTA Usualmente, estes sistemas obedecem a regulamentos especiais elaborados por autoridades específicas.

2 Referências normativas

Os documentos relacionados a seguir são indispensáveis à aplicação deste documento. Para referências datadas, aplicam-se somente as edições citadas. Para referências não datadas, aplicam-se as edições mais recentes do referido documento (incluindo emendas).

ABNT NBR 5410, *Instalações elétricas de baixa tensão*

ABNT NBR 5419-2:2015, *Proteção contra descargas atmosféricas – Parte 2: Gerenciamento de risco*

ABNT NBR 5419-3:2015, *Proteção contra descargas atmosféricas – Parte 3: Danos físicos a estruturas e perigos à vida*

ABNT NBR 5419-4:2015, *Proteção contra descargas atmosféricas – Parte 4: Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura*

ABNT NBR 6323, *Galvanização de produtos de aço ou ferro fundido – Especificação*

ABNT NBR 13571, *Haste de aterramento aço-cobreado e acessórios*

ABNT NBR IEC 60079-10-1, *Atmosferas explosivas – Parte 10-1: Classificação de áreas – Atmosferas explosivas de gás*

ABNT NBR IEC 60079-10-2, *Atmosferas explosivas – Parte 10-2: Classificação de áreas – Atmosferas de poeiras combustíveis*

ABNT NBR IEC 60079-14, *Atmosferas explosivas – Parte 14: Projeto, seleção e montagem de instalações elétricas*

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

3 Termos e definições

Para os efeitos deste documento, aplicam-se os seguintes termos e definições.

3.1
descarga atmosférica para terra *(lightning flash to earth)*
descarga elétrica de origem atmosférica entre nuvem e terra, consistindo de uma ou mais componentes da descarga atmosférica

3.2
descarga atmosférica descendente *(downward flash)*
descarga atmosférica iniciada por um líder descendente de uma nuvem para terra

3.3
descarga atmosférica ascendente *(upward flash)*
descarga atmosférica iniciada por um líder ascendente de uma estrutura aterrada para uma nuvem

3.4
componente da descarga atmosférica *(lightning stroke)*
descarga elétrica singela de uma descarga atmosférica para a terra

3.5
componente curta da descarga atmosférica
parte de uma descarga atmosférica para a terra que corresponde a um impulso de corrente

NOTA A corrente em questão tem um tempo para o meio valor T_2 tipicamente inferior a 2 ms (ver Figura A.1).

3.6
componente longa da descarga atmosférica (*long stroke)*
parte de uma descarga atmosférica para a terra que corresponde a componente da corrente de continuidade

NOTA A duração T_{longo} (intervalo entre o valor 10 % na frente até o valor 10 % na cauda) desta corrente de continuidade é tipicamente superior a 2 ms e menor que 1 s (ver Figura A.2).

3.7
múltiplos componentes da descarga atmosférica (*multiple strokes)*
descarga atmosférica para a terra que consiste em média de três a quatro componentes, com um intervalo de tempo típico entre eles de cerca de 50 ms

NOTA Há relatos de eventos que têm algumas dezenas de componentes com intervalos entre eles entre 10 ms e 250 ms.

3.8
ponto de impacto (*point of strike)*
ponto onde uma descarga atmosférica atinge a terra, ou um objeto elevado (por exemplo, estrutura, SPDA, serviços, árvore, etc.)

NOTA Uma descarga atmosférica para a terra pode ter diversos pontos de impacto.

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

3.9
corrente da descarga atmosférica *(lightning current)*
i
corrente que flui no ponto de impacto

3.10
valor de pico da corrente
I
máximo valor da corrente de descarga atmosférica

3.11
taxa média de variação da frente de onda do impulso de corrente
taxa média de variação da corrente em sua frente de onda no intervalo entre os instantes em que são atingidos 10 % e 90 % do valor de pico (ver Figura A.1)

NOTA Este parâmetro é expresso pela diferença dos valores da corrente $\Delta i = i(t_2) - i(t_1)$, no início e no final do intervalo $\Delta t = t_2 - t_1$, dividido pelo valor do intervalo Δt.

3.12
tempo de frente da onda de corrente de impulso
T_1
parâmetro virtual definido como 1,25 vez o intervalo de tempo entre os instantes em que os valores de 10 % e 90 % do valor de pico são atingidos (ver Figura A.1)

3.13
origem virtual da corrente de impulso
O_1
ponto de intersecção com o eixo dos tempos de uma linha reta traçada por meio dos pontos de referência de 10 % e 90 % do valor de pico (ver Figura A.1); ele precede em 0,1 T_1 do instante no qual a corrente atinge 10 % do seu valor de pico

3.14
tempo até o meio valor da cauda da onda de corrente de impulso
T_2
parâmetro virtual definido como um intervalo de tempo entre a origem virtual O_1 e o instante no qual a corrente decresceu à metade do valor de pico (ver Figura A.1)

3.15
duração da descarga atmosférica *(flash duration)*
T
intervalo de tempo durante o qual a corrente da descarga atmosférica flui no ponto de impacto

3.16
duração da componente longa da descarga atmosférica *(duration of long stroke current)*
T_{longa}
intervalo de tempo durante o qual a corrente em uma descarga atmosférica longa permanece entre 10 % do valor de pico no início do crescimento da corrente de continuidade e 10 % do valor de pico ao final do decréscimo desta corrente (ver Figura A.2)

3.17
carga de uma descarga atmosférica *(flash charge)*
Q_{flash}
valor resultante da integral da corrente no tempo de uma descarga atmosférica

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

3.18
carga do impulso
Q_{curta}
valor resultante da integral da corrente no tempo do impulso relacionado à descarga atmosférica

3.19
carga da componente longa da descarga atmosférica *(long stroke charge)*
Q_{longa}
valor resultante da integral da corrente no tempo da componente longa da descarga atmosférica

3.20
energia específica
W/R
valor resultante da integral da corrente ao quadrado da descarga atmosférica no tempo

NOTA Este parâmetro representa a energia dissipada pela corrente da descarga atmosférica em uma resistência de valor unitário.

3.21
energia específica de um impulso de corrente
valor resultante da integral da corrente ao quadrado no tempo para a duração de uma descarga atmosférica curta

NOTA A energia específica da componente longa da corrente de uma descarga atmosférica é desprezível.

3.22
estrutura a ser protegida
estrutura para qual a proteção contra os efeitos das descargas atmosféricas é necessária de acordo com esta Parte da ABNT NBR 5419

NOTA 1 A estrutura a ser protegida pode ser parte de uma estrutura maior.

NOTA 2 Estrutura: termo genérico que define um elemento a ser protegido pelo SPDA, por exemplo, edificações, prédios, árvores, massas metálicas (antenas, guarda corpos, etc.).

3.23
linha
linha de energia ou linha de sinal conectada à estrutura a ser protegida

3.24
linhas de sinal *(telecommunication lines)*
linhas utilizadas para comunicação entre equipamentos que podem ser instalados em estruturas separadas, como as linhas telefônicas e as linhas de dados

3.25
linhas de energia *(power lines)*
linhas que fornecem energia elétrica para dentro de uma estrutura aos equipamentos eletrônicos e elétricos de potência localizados nesta, como as linhas de alimentação em baixa tensão (BT) ou alta tensão (AT)

3.26
descarga atmosférica na estrutura *(lightning flash to a structure)*
descarga atmosférica em uma estrutura a ser protegida

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

3.27
descarga atmosférica perto de uma estrutura *(lightning flash near a structure)*
descarga atmosférica que ocorre perto o suficiente de uma estrutura a ser protegida e que pode causar sobretensões perigosas

3.28
sistema elétrico
sistema que incorpora componentes de alimentação em baixa tensão

3.29
sistema eletrônico
sistema que incorpora os componentes de uma instalação elétrica de sinal, por exemplo, equipamentos eletrônicos de telecomunicações, controladores microprocessados, sistemas de instrumentação, sistemas de rádio

3.30
sistemas internos
sistemas elétricos e eletrônicos dentro de uma estrutura

3.31
danos físicos
danos a uma estrutura (ou a seu conteúdo) ou a uma linha devido aos efeitos mecânicos, térmicos, químicos ou explosivos da descarga atmosférica

3.32
ferimentos a seres vivos
ferimentos, incluindo perda da vida, em pessoas ou animais devido a tensões de toque e de passo causadas pelas descargas atmosféricas

NOTA Apesar dos seres vivos poderem se machucar de outras formas, nesta Parte da ABNT NBR 5419, o termo “ferimentos a seres vivos” se limita à ameaça devido a choque elétrico (dano tipo D1).

3.33
falha de sistemas eletroeletrônicos
danos permanentes de sistemas eletroeletrônicos devido aos LEMP

3.34
pulso eletromagnético devido às descargas atmosféricas *(lightning electromagnectic impulse)*
LEMP
todos os efeitos eletromagnéticos causados pela corrente das descargas atmosféricas por meio de acoplamento resistivo, indutivo e capacitivo, que criam surtos e campos eletromagnéticos radiados

3.35
surto
efeitos transitórios causados por LEMP que aparecem na forma de sobretensão e/ou sobrecorrente

3.36
zona de proteção contra descarga atmosférica “raio” (*lightning protection zone – LPZ*)
ZPR
zona onde o ambiente eletromagnético causado pelo raio é definido

NOTA O contorno de uma ZPR não é necessariamente dado por elementos físicos (por exemplo, paredes, piso e teto).

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

3.37
risco
R
valor da perda média anual provável (pessoas e bens) devido à descarga atmosférica em relação ao valor total (pessoas e bens) da estrutura a ser protegida

3.38
risco tolerável
R_T
valor máximo do risco que pode ser tolerável para a estrutura a ser protegida

3.39
nível de proteção contra descargas atmosféricas *(lightning protection level – LPL)*
NP
número associado a um conjunto de parâmetros da corrente elétrica para garantir que os valores especificados em projeto não estão superdimensionados ou subdimensionados quando da ocorrência de uma descarga atmosférica

3.40
medidas de proteção
medidas a serem adotadas na estrutura a ser protegida, com o objetivo de reduzir os riscos

3.41
proteção contra descargas atmosféricas *(lightning protection – LP)*
PDA
sistema completo para proteção de estruturas contra as descargas atmosféricas, incluindo seus sistemas internos e conteúdo, assim como as pessoas, em geral consistindo em SPDA e MPS

3.42
sistema de proteção contra descargas atmosféricas *(lightning protection system – LPS)*
SPDA
sistema utilizado para reduzir danos físicos devido às descargas atmosféricas em uma estrutura

NOTA Um SPDA consiste em sistemas externo e interno de proteção contra descargas atmosféricas.

3.43
SPDA externo *(external lightning protection system)*
parte do SPDA composto pelos subsistemas de captação, descida e aterramento

3.44
SPDA interno *(internal lightning protection system)*
parte do SPDA consistindo em ligações equipotenciais e/ou isolação elétrica do SPDA externo

3.45
subsistema de captação *(air-termination system)*
parte de um SPDA externo usando elementos metálicos como hastes, condutores em malha ou cabos em catenária, projetados e posicionados para interceptarem descargas atmosféricas

3.46
subsistema de descida *(down-conductor system)*
parte de um SPDA externo que tem como objetivo conduzir a descarga atmosférica do subsistema de captação ao subsistema de aterramento

3.47
subsistema de aterramento *(earth-termination system)*
parte de um SPDA externo que tem como objetivo conduzir e dispersar a descarga atmosférica no solo

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

3.48
partes condutoras externas
elementos metálicos que penetram ou saem da estrutura a ser protegida que podem se tornar um caminho para parte da corrente da descarga atmosférica, como tubulações, linhas metálicas, dutos metálicos etc.

3.49
ligação equipotencial para descargas atmosféricas *(lightning equipotential bonding)*
EB
ligação ao SPDA de partes metálicas separadas, por conexões condutoras diretas ou por meio de dispositivos de proteção contra surtos, para reduzir diferenças de potenciais causadas pelas correntes das descargas atmosféricas

3.50
impedância convencional de aterramento *(conventional earthing impedance)*
relação entre os valores de pico da tensão e da corrente do eletrodo de aterramento, os quais, em geral, não acontecem simultaneamente

3.51
medidas de proteção contra surtos causados por LEMP *(LEMP protection measures)*
MPS
conjunto de medidas tomadas para proteger os sistemas internos contra os efeitos causados por LEMP

3.52
blindagem magnética
tela metálica, em forma de malha ou contínua, que envolve a estrutura a ser protegida, ou parte dela, utilizada para reduzir falhas dos sistemas eletroeletrônicos

3.53
dispositivo de proteção contra surtos *(surge protective device – SPD)*
DPS
dispositivo destinado a limitar as sobretensões e desviar correntes de surto. Contém pelo menos um componente não-linear

3.54
coordenação de DPS
DPS adequadamente selecionados, coordenados e instalados para formar um conjunto que visa reduzir falhas dos sistemas internos

3.55
nível de tensão nominal suportável de impulso *(rated impulse withstand voltage level)*
U_W
tensão suportável de impulso definida pelo fabricante de um equipamento, ou de uma parte dele, caracterizando a suportabilidade específica da sua isolação contra sobretensões

NOTA Para as finalidades desta Parte da ABNT NBR 5419, considera-se somente a tensão suportável entre condutores vivos e a terra, conforme a IEC 60664-1:2007, 3.9.2

3.56
interfaces isolantes
dispositivos que são capazes de reduzir surtos conduzidos nas linhas que adentram as zonas de proteção contra os raios (ZPR)

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

3.57
plano de referência
superfície, geralmente plana, sobre a qual se faz a projeção do volume de proteção de elementos do subsistema de captação ou sobre a qual se movimenta a esfera rolante na aplicação dos cálculos dos métodos de proteção. Vários planos de referência em diferentes níveis podem ser considerados na região dos componentes do subsistema de captação sob análise

3.58
equipotencialização
conjunto de medidas que visa a redução das tensões nas instalações causadas pelas descargas atmosféricas a níveis suportáveis para essas instalações e equipamentos por elas servidos, além de reduzir riscos de choque elétrico. Tais medidas consistem tipicamente em ligações entre partes metálicas das instalações e destas ao SPDA, direta ou indiretamente (por meio de DPS), envolvendo massas metálicas de equipamentos, condutores de proteção, malhas de condutores instaladas sob ou sobre equipamentos sensíveis, blindagens de cabos e condutos metálicos, elementos metálicos estruturais, tubulações metálicas entre outros

NOTA Rigorosamente, equipotencialização é um conceito que somente se aplica em corrente contínua ou, de forma aproximada, em baixas frequências. Para as componentes de frequências mais altas das correntes das descargas atmosféricas, algumas das medidas tipicamente empregadas com finalidade de equipotencialização podem ter efeito de redução de tensão entre os pontos onde a ligação equipotencial é feita, contanto que essa ligação seja curta (por exemplo, não mais que poucas dezenas de centímetros para condutores cilíndricos de bitolas usuais em instalações elétricas). Medidas como o uso de cabos blindados, o encaminhamento de cabos por condutos metálicos ou próximos a grandes estruturas condutoras são geralmente mais eficientes e espacialmente mais abrangentes em alta frequência. A noção de equipotencialização de modo genérico, porém, é útil no controle da sobretensão durante a parte em que a progressão do impulso de corrente da descarga atmosférica é mais lenta, sobretensão esta que pode estar associada a elevados níveis de energia por conta da longa duração.

4 Parâmetros da corrente da descarga atmosférica

Os parâmetros da corrente da descarga atmosférica usados na série ABNT NBR 5419 são relacionados no Anexo A.

Os parâmetros da corrente da descarga atmosférica em função do tempo usados para a análise são relacionados no Anexo B.

As informações para simulação da corrente da descarga atmosférica para fins de ensaios são dadas no Anexo C.

Os parâmetros básicos para uso em laboratório para simular os efeitos das descargas atmosféricas nos componentes do SPDA estão relatados no Anexo D.

Informações sobre surtos devido às descargas atmosféricas em diferentes pontos da instalação são apresentadas no Anexo E.

5 Danos devido às descargas atmosféricas

5.1 Danos à estrutura

A descarga atmosférica que atinge uma estrutura pode causar danos à própria estrutura e a seus ocupantes e conteúdos, incluindo falhas dos sistemas internos. Os danos e falhas podem se estender também às estruturas vizinhas e podem ainda envolver o ambiente local. A extensão dos danos e falhas na vizinhança depende das características das estruturas e das características da descarga atmosférica.

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

5.1.1 Efeitos das descargas atmosféricas sobre uma estrutura

As principais características das estruturas relevantes para os efeitos das descargas atmosféricas incluem:

a) construção (por exemplo, madeira, alvenaria, concreto, concreto armado, estrutura em aço);

b) função (residência, escritório, comércio, rural, teatro, hotel, escola, hospital, museu, igreja, prisão, *shopping center*, banco, fábrica, área industrial, área de práticas esportivas);

c) ocupantes e conteúdos (pessoas e animais, presença ou não de materiais combustíveis ou explosivos, sistemas elétricos e eletrônicos de baixa tensão ou alta tensão);

d) linhas elétricas e tubulações metálicas que adentram a estrutura (linhas de energia, linhas de sinal, tubulações);

e) medidas de proteção existentes ou providas (por exemplo, medidas de proteção para reduzir danos físicos e risco à vida, medidas de proteção para reduzir falhas em sistemas internos);

f) dimensão do risco (estrutura com dificuldade de evacuação ou estrutura na qual pode haver pânico, estrutura perigosa às redondezas, estrutura perigosa ao ambiente).

A Tabela 1 apresenta os efeitos das descargas atmosféricas nos vários tipos de estruturas.

Tabela 1 – Efeitos das descargas atmosféricas nos vários tipos de estruturas

Tipo de estrutura de acordo com sua finalidade e/ou conteúdo	Efeitos das descargas atmosféricas
Casa de moradia	Perfuração da isolação das instalações elétricas, incêndio e danos materiais. Danos normalmente limitados a objetos expostos ao ponto de impacto ou no caminho da corrente da descarga atmosférica. Falha de equipamentos e sistemas elétricos e eletrônicos instalados (exemplos: aparelhos de TV, computadores, *modems*, telefones etc.).
Edificação em zona rural	Risco maior de incêndio e tensões de passo perigosas, assim como danos materiais. Risco secundário devido à perda de energia elétrica e risco de vida dos animais de criação devido à falha de sistemas de controle eletrônicos de ventilação e suprimento de alimentos etc.
Teatro ou cinema Hotel Escola *Shopping centers* Áreas de esportes	Danos em instalações elétricas que tendem a causar pânico (por exemplo, iluminação elétrica) Falhas em sistemas de alarme de incêndio, resultando em atrasos nas ações de combate a incêndio.
Banco Empresa de seguros Estabelecimento comercial etc.	Conforme acima, adicionando-se problemas resultantes da perda de comunicação, falha de computadores e perda de dados.

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Tabela 1 (continuação)

Tipo de estrutura de acordo com sua finalidade e/ou conteúdo	Efeitos das descargas atmosféricas
Hospital Casa de tratamento médico Casa para idosos Creche Prisão	Conforme acima, adicionando-se os problemas relacionados a pessoas em tratamento médico intensivo e a dificuldade de resgatar pessoas incapazes de se mover.
Indústria	Efeitos adicionais dependendo do conteúdo das fábricas, que vão desde os menos graves até danos inaceitáveis e perda de produção.
Museu e sítio arqueológico Igreja	Perda de patrimônio cultural insubstituível.
Estação de telecomunicações Estação de geração e transmissão de energia elétrica	Interrupções inaceitáveis de serviços ao público.
Fábrica de fogos de artifícios Trabalhos com munição	Incêndio e explosão com consequências à planta e arredores.
Indústria química Refinaria Usina nuclear Indústria e laboratório de bioquímica	Incêndio e mau funcionamento da planta com consequências prejudiciais ao meio ambiente local e global.

5.1.2 Fontes e tipos de danos a uma estrutura

A corrente da descarga atmosférica é a fonte de danos. As seguintes situações devem ser levadas em consideração em função da posição do ponto de impacto relativo à estrutura considerada:

a) S1: descargas atmosféricas na estrutura;

b) S2: descargas atmosféricas próximas à estrutura;

c) S3: descargas atmosféricas sobre as linhas elétricas e tubulações metálicas que entram na estrutura;

d) S4: descargas atmosféricas próximas às linhas elétricas e tubulações metálicas que entram na estrutura.

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

5.1.2.1 Descargas atmosféricas na estrutura

Podem causar:

a) danos mecânicos imediatos, fogo e/ou explosão devido ao próprio plasma quente do canal da descarga atmosférica, ou devido à corrente resultando em aquecimento resistivo de condutores (condutores sobreaquecidos), ou devido à carga elétrica resultando em erosão pelo arco (metal fundido);

b) fogo e/ou explosão iniciado por centelhamento devido a sobretensões resultantes de acoplamentos resistivos e indutivos e à passagem de parte da corrente da descarga atmosférica;

c) danos às pessoas por choque elétrico devido a tensões de passo e de toque resultantes de acoplamentos resistivos e indutivos;

d) falha ou mau funcionamento de sistemas internos devido a LEMP.

5.1.2.2 Descargas atmosféricas próximas à estrutura

Podem causar falha ou mau funcionamento de sistemas internos devido a LEMP.

5.1.2.3 Descargas atmosféricas sobre linhas elétricas e tubulações metálicas que adentram a estrutura

Podem causar:

a) fogo e/ou explosão iniciado por centelhamento devido a sobretensões e correntes das descargas atmosféricas transmitidas por meio das linhas elétricas e tubulações metálicas;

b) danos a pessoas por choque elétrico devido a tensões de toque dentro da estrutura causadas por correntes das descargas atmosféricas transmitidas pelas linhas elétricas e tubulações metálicas;

c) falha ou mau funcionamento de sistemas internos devido à sobretensões que aparecem nas linhas que entram na estrutura.

5.1.2.4 Descargas atmosféricas próximas a linhas elétricas e tubulações metálicas que entram na estrutura

Podem causar falha ou mau funcionamento de sistemas internos devido à sobretensões induzidas nas linhas que entram na estrutura.

Em consequência, as descargas atmosféricas podem causar três tipos básicos de danos:

a) D1: danos às pessoas devido a choque elétrico;

b) D2: danos físicos (fogo, explosão, destruição mecânica, liberação de produtos químicos) devido aos efeitos das correntes das descargas atmosféricas, inclusive centelhamento;

c) D3: falhas de sistemas internos devido a LEMP.

5.2 Tipos de perdas

Cada tipo de dano relevante para a estrutura a ser protegida, sozinho ou em combinações com outros, pode, em consequência, produzir diferentes perdas. O tipo de perda que pode ocorrer depende das

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

características do próprio objeto.

Para efeitos da ABNT NBR 5419, são considerados os seguintes tipos de perdas, os quais podem aparecer como consequência de danos relevantes à estrutura:

a) L1: perda de vida humana (incluindo-se danos permanentes);

b) L2: perda de serviço ao público;

c) L3: perda de patrimônio cultural;

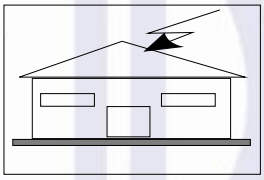
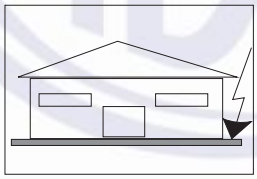
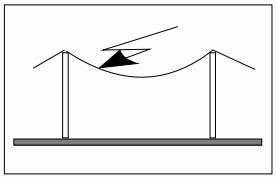
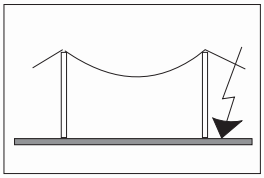
d) L4: perda de valor econômico (estrutura e seu conteúdo, assim como interrupções de atividades).

NOTA Para efeitos da ABNT NBR 5419, somente são considerados serviços ao público os suprimentos de água, gás, energia e sinais de TV e telecomunicações.

Perdas dos tipos L1, L2 e L3 podem ser consideradas como perdas de valor social, enquanto perdas do tipo L4 podem ser consideradas como perdas puramente econômicas.

A correspondência entre fonte de danos, tipo de danos e perdas é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2 – Danos e perdas relevantes para uma estrutura para diferentes pontos de impacto da descarga atmosférica

Ponto de impacto		Fonte de dano	Tipo de dano	Tipo de perda
Estrutura		S1	D1 D2 D3	L1, L4[a] L1, L2, L3, L4 L1[b], L2, L4
Nas proximidades de uma estrutura		S2	D3	L1[b], L2, L4
Linhas elétricas ou tubulações metálicas conectadas à estrutura		S3	D1 D2 D3	L1, L4[a] L1, L2, L3, L4 L1[b], L2, L4
Proximidades de uma linha elétrica ou tubulação metálica		S4	D3	L1[b], L2, L4

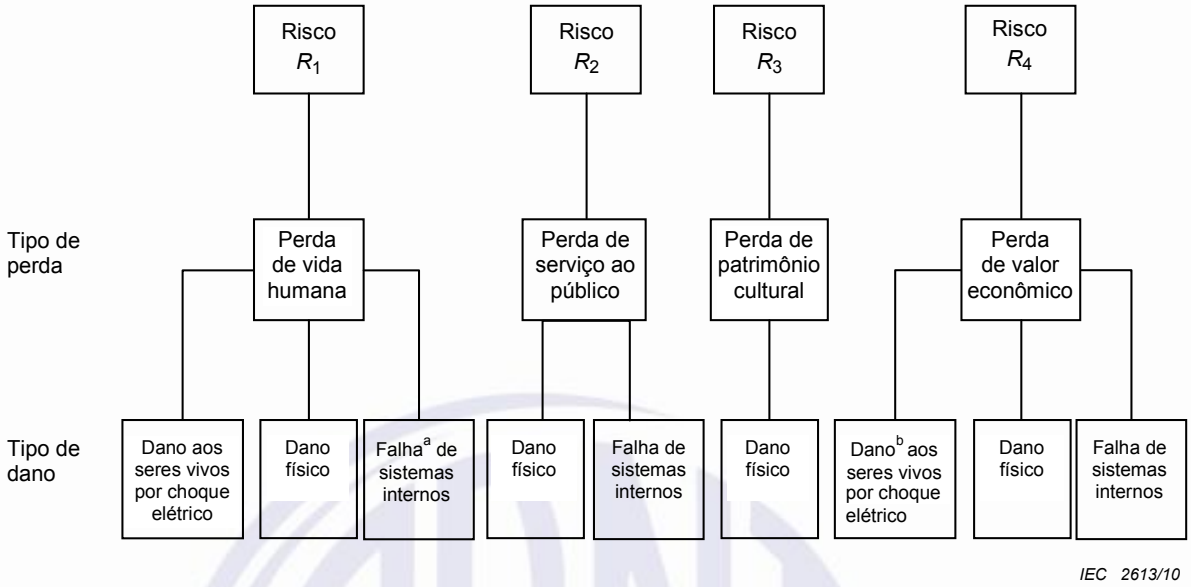
[a] Somente para propriedades onde pode haver perdas de animais.

[b] Somente para estruturas com risco de explosão, hospitais ou outras estruturas nas quais falhas em sistemas internos colocam a vida humana diretamente em perigo.

Tipos de perdas resultantes dos tipos de danos e os riscos correspondentes estão relacionados na Figura 2.

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]



[a] Somente para hospitais ou outras estruturas nas quais falhas em sistemas internos colocam a vida humana diretamente em perigo.

[b] Somente para propriedades onde pode haver perdas de animais.

Figura 2 – Tipos de perdas e riscos correspondentes que resultam de diferentes tipos de danos

6 Necessidade e vantagem econômica da proteção contra descargas atmosféricas

6.1 Necessidade da proteção contra descargas atmosféricas

A necessidade de um objeto ser protegido contra descargas atmosféricas deve ser avaliada de modo a reduzir as perdas de valor social L1, L2 e L3.

Para se avaliar quando uma proteção contra descargas atmosféricas é necessária ou não, deve ser feita uma avaliação do risco de acordo com os procedimentos contidos na ABNT NBR 5419-2. Os seguintes riscos devem ser levados em conta, em correspondência aos tipos de perdas relacionadas em 5.2:

a) R_1: risco de perdas ou danos permanentes em vidas humanas;

b) R_2: risco de perdas de serviços ao público;

c) R_3: risco de perdas do patrimônio cultural.

NOTA Recomenda-se que o risco de perdas de valor econômico (risco R_4) seja avaliado sempre que a vantagem econômica da proteção contra descargas atmosféricas for considerada (ver 6.2).

A proteção contra descargas atmosféricas é necessária se o risco R (R_1 a R_3) for maior que o risco tolerado R_T:

$$R > R_T$$

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Neste caso, devem ser adotadas medidas de proteção de modo a reduzir o risco R (R_1 a R_3) ao nível tolerável R_T:

$$R \leq R_T$$

Se puder aparecer mais de um tipo de perda, a condição $R \leq R_T$ deve ser satisfeita para cada tipo de perda (L1, L2 e L3).

NOTA Informações detalhadas sobre avaliação de risco e do procedimento para escolha das medidas de proteção são relatadas na ABNT NBR 5419-2.

6.2 Vantagem econômica da proteção contra descargas atmosféricas

Além da necessidade de proteção contra descargas atmosféricas para a estrutura a ser protegida, pode ser vantajoso avaliar os benefícios econômicos de se adotar medidas de proteção de modo a reduzir a perda econômica L4.

Neste caso, deve ser avaliado o risco R_4 de perda de valor econômico. A avaliação do risco R_4 permite avaliar o custo da perda econômica com e sem adoção das medidas de proteção.

A proteção contra descargas atmosféricas é conveniente se a soma do custo C_{RL} das perdas residuais na presença das medidas de proteção e o custo C_{PM} das medidas de proteção for menor que o custo C_L da perda total sem as medidas de proteção:

$$C_{RL} + C_{PM} < C_L$$

NOTA Informações detalhadas da avaliação da vantagem econômica da proteção contra descargas atmosféricas são relatadas na ABNT NBR 5419-2.

7 Medidas de proteção

7.1 Geral

Podem ser adotadas medidas de proteção de modo a reduzir o risco de acordo com o tipo de dano.

7.2 Medidas de proteção para reduzir danos a pessoas devido a choque elétrico

São possíveis as seguintes medidas de proteção:

a) isolação adequada das partes condutoras expostas;

b) equipotencialização por meio de um sistema de aterramento em malha;

c) restrições físicas e avisos;

d) ligação equipotencial para descargas atmosféricas (LE).

NOTA 1 A equipotencialização e o aumento da resistência de contato da superfície do solo, interna ou externamente à estrutura, podem reduzir o risco de vida (ABNT NBR 5419-3:2015, Seção 8).

NOTA 2 Medidas de proteção são eficientes somente em estruturas protegidas por um SPDA.

NOTA 3 O uso de detectores de tempestades e medidas complementares podem reduzir o risco de vida.

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

7.3 Medidas de proteção para redução de danos físicos

A proteção é alcançada por meio de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) o qual inclui as seguintes características:

a) subsistema de captação;

b) subsistema de descida;

c) subsistema de aterramento;

d) equiponcialização para descargas atmosféricas (EB);

e) isolação elétrica (e daí a distância de segurança).

NOTA 1 Quando for instalado um SPDA, a equipotencialização é uma medida essencial para reduzir os perigos de incêndio e de explosão e o risco de vida. Para mais detalhes, ver ABNT NBR 5419-3.

NOTA 2 A redução de danos físicos pode ser obtida por medidas que limitem o desenvolvimento e propagação de fogo, como compartimentos à prova de fogo, extintores, hidrantes, instalações de alarme de incêndio e extinção de fogo.

NOTA 3 A instalação de rotas de fuga minimizam os riscos de danos físicos.

7.4 Medidas de proteção para redução de falhas dos sistemas elétricos e eletrônicos

Medidas de proteção contra surtos (MPS) possíveis:

a) medidas de aterramento e equipotencialização;

b) blindagem magnética;

c) roteamento da fiação;

d) interfaces isolantes;

e) sistema de DPS coordenado.

Estas medidas podem ser usadas sozinhas ou combinadas.

NOTA 1 Ao se considerar uma fonte de danos tipo S1, as medidas de proteção são eficientes somente em estruturas protegidas por um SPDA.

NOTA 2 O uso de detectores de tempestades e medidas complementares podem reduzir as falhas de sistemas elétricos e eletrônicos.

7.5 Escolha das medidas de proteção

As medidas de proteção relacionadas em 7.2, 7.3 e 7.4, juntas, compõem o sistema completo de proteção contra descargas atmosféricas.

A escolha das medidas mais adequadas de proteção deve ser feita pelo responsável técnico e ser protegida, de acordo com o tipo e valor de cada tipo de dano, com os aspectos técnicos e econômicos das diferentes medidas de proteção e dos resultados da avaliação de riscos.

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Os critérios para a avaliação do risco e para escolha das medidas de proteção mais adequadas estão relatados na ABNT NBR 5419-2.

As medidas de proteção são efetivas desde que elas satisfaçam os requisitos das normas correspondentes e sejam capazes de suportar os esforços esperados nos respectivos locais de suas instalações.

8 Critérios básicos para proteção de estruturas

8.1 Geral

Uma proteção ideal para estruturas é envolver completamente a estrutura a ser protegida por uma blindagem contínua perfeitamente condutora, aterrada e de espessura adequada, e, além disso, providenciar ligações equipotenciais adequadas para as linhas elétricas e tubulações metálicas que adentram na estrutura nos pontos de passagem pela blindagem.

Isto impede a penetração da corrente da descarga atmosférica e campo eletromagnético associado na estrutura a ser protegida e evita efeitos térmicos e eletrodinâmicos perigosos da corrente assim como centelhamentos e sobretensões perigosas para os sistemas internos.

Na prática, porém, a aplicação de tais medidas para se obter total proteção é frequentemente inviável.

A falta de continuidade da blindagem e/ou sua espessura inadequada permite a penetração da corrente da descarga atmosférica e seus efeitos pela blindagem, podendo causar:

a) danos físicos e risco de vida;

b) falha dos sistemas internos.

As medidas de proteção, adotadas para reduzir tais danos e perdas relevantes, devem ser projetadas para um conjunto definido de parâmetros das correntes das descargas atmosféricas, frente às quais é requerida a proteção, conforme o nível de proteção contra descargas atmosféricas.

8.2 Níveis de proteção contra descargas atmosféricas (NP)

Para efeitos da ABNT NBR 5419, são considerados quatro níveis de proteção contra descargas atmosféricas (I a IV). Para cada NP, é fixado um conjunto de parâmetros máximos e mínimos das correntes das descargas atmosféricas.

NOTA 1 A proteção contra descargas atmosféricas cujos parâmetros máximos e mínimos de corrente excedam aqueles correspondentes ao NP I requer medidas de proteção mais eficientes, as quais recomenda-se que sejam escolhidas e implementadas para cada caso específico.

NOTA 2 A probabilidade de ocorrência de descargas atmosféricas cujos parâmetros de correntes estejam fora do intervalo máximo e mínimo do NP I é menor que 2 %.

Os valores máximos dos parâmetros das correntes das descargas atmosféricas correspondentes ao NP I não podem ser excedidos, com uma probabilidade de 99 %. De acordo com a relação de polaridade assumida (ver A.2), os valores assumidos para as descargas atmosféricas positivas têm probabilidades inferiores a 10 %, enquanto que aqueles para as descargas atmosféricas negativas permanecem abaixo de 1 % (ver A.3).

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Os valores máximos dos parâmetros das correntes das descargas atmosféricas correspondentes ao NP I são reduzidos a 75 % para o nível II e a 50 % para o nível III e IV (reduções lineares para *I*, *Q* e d*i*/d*t*, mas quadrática para *W/R*). Os parâmetros de tempo não mudam.

NOTA 3 Os níveis de proteção contra descargas atmosféricas cujos parâmetros máximos de corrente sejam menores que aqueles correspondentes ao NP IV permitem considerar valores de probabilidade de danos maiores que aqueles apresentados na ABNT NBR 5419-2:2015, Anexo B, embora não quantificados, mas que podem ser úteis para um ajuste mais adequado das medidas de proteção a fim de se evitar custos injustificavelmente altos.

Os valores máximos dos parâmetros das correntes das descargas atmosféricas para os diferentes níveis de proteção são dados na Tabela 3 e são usados para projetar componentes de proteção contra descargas atmosféricas (por exemplo, seção transversal dos condutores, espessuras das chapas metálicas, capacidade de condução de corrente dos DPS, distância de segurança contra centelhamentos perigosos) e para definir parâmetros de ensaios que simulam os efeitos das descargas atmosféricas sob tais componentes (ver Anexo D).

Os valores mínimos de amplitudes das correntes das descargas atmosféricas para os diferentes NP são usados para se determinar o raio da esfera rolante (ver A.4) de modo a definir a zona de proteção contra descargas atmosféricas ZPR 0_B, a qual não pode ser alcançada por descargas atmosféricas diretas (ver 8.3 e Figuras 3 e 4). Os valores mínimos dos parâmetros das correntes das descargas atmosféricas junto com os raios das esferas rolantes correspondentes são dados na Tabela 4. Eles são usados para posicionar os componentes do subsistema de captação e para definir as zonas de proteção contra descargas atmosféricas ZPR 0_B (ver 8.3).

Tabela 3 – Valores máximos dos parâmetros das descargas atmosféricas correspondentes aos níveis de proteção (NP)

Primeiro impulso positivo			**NP**			
Parâmetros da corrente	**Símbolo**	**Unidade**	**I**	**II**	**III**	**IV**
Corrente de pico	*I*	kA	200	150	100	
Carga do impulso	Q_{curta}	C	100	75	50	
Energia específica	*W/R*	MJ/Ω	10	5,6	2,5	
Parâmetros de tempo	T_1 / T_2	µs / µs	10/350			
Primeiro impulso negativo[a]			**NP**			
Parâmetros da corrente	**Símbolo**	**Unidade**	**I**	**II**	**III**	**IV**
Valor de pico	*I*	kA	100	75	50	
Taxa média de variação	d*i*/d*t*	kA/µs	100	75	50	
Parâmetros de tempo	T_1 / T_2	µs / µs	1/200			
Impulso subsequente			**NP**			
Parâmetros da corrente	**Símbolo**	**Unidade**	**I**	**II**	**III**	**IV**
Valor de pico	*I*	kA	50	37,5	25	
Taxa média de variação	d*i*/d*t*	kA/µs	200	150	100	
Parâmetros de tempo	T_1 / T_2	µs / µs	0,25/100			

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Tabela 3 (continuação)

Componente longa da descarga atmosférica			**NP**			
Parâmetros da corrente	**Símbolo**	**Unidade**	**I**	**II**	**III**	**IV**
Carga da componente longa	Q_{longa}	C	200	150	100	
Parâmetros de tempo	T_{longa}	s	0,5			
Descarga atmosférica			**NP**			
Parâmetros da corrente	**Símbolo**	**Unidade**	**I**	**II**	**III**	**IV**
Carga da descarga atmosférica	Q_{flash}	C	300	225	150	
[a] O uso desta forma de onda de corrente é de interesse para cálculos somente, não para ensaios.						

Tabela 4 – Valores mínimos dos parâmetros das descargas atmosféricas e respectivos raios da esfera rolante, correspondentes aos níveis de proteção (NP)

Critérios de interceptação			**NP**			
	Símbolo	**Unidade**	**I**	**II**	**III**	**IV**
Corrente de pico mínima	I	kA	3	5	10	16
Raio da esfera rolante	r	m	20	30	45	60

Das distribuições estatísticas dadas na Figura A.5, pode ser determinada uma probabilidade ponderada, tal que os parâmetros das correntes das descargas atmosféricas são menores que os valores máximos e respectivamente maiores que os valores mínimos definidos para cada nível de proteção (ver Tabela 5).

Tabela 5 – Probabilidades para os limites dos parâmetros das correntes das descargas atmosféricas

Probabilidade de que os parâmetros da corrente sejam:	**NP**			
	I	**II**	**III**	**IV**
menores que os máximos valores definidos na Tabela 3	0,99	0,98	0,95	0,95
maiores que os mínimos valores definidos na Tabela 4	0,99	0,97	0,91	0,84

As medidas de proteção especificadas na ABNT NBR 5419-3 e na ABNT NBR 5419-4 são efetivas contra descargas atmosféricas cujos parâmetros de corrente estiverem na faixa definida pelo NP adotado para o projeto. Desta maneira, assume-se que a eficiência de uma medida de proteção é igual à probabilidade com a qual os parâmetros das correntes das descargas atmosféricas estão dentro de tal faixa. Para parâmetros que excedam esta faixa, permanece um risco residual de danos.

8.3 Zonas de proteção contra descarga atmosférica “raio” (ZPR)

As medidas de proteção como SPDA, condutores de blindagem, blindagens magnéticas e DPS determinam as zonas de proteção contra descargas atmosféricas “raio” (ZPR).

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

As ZPR a jusante de uma medida de proteção são caracterizadas por uma redução significativa dos LEMP, em comparação com a ZPR a montante.

A respeito da ameaça de descarga atmosférica, as seguintes ZPR são definidas (ver Figuras 3 e 4):

a) ZPR 0_A: zona onde a ameaça é devido à queda direta e ao campo eletromagnético total da descarga atmosférica. Os sistemas internos podem estar sujeitos à corrente total ou parcial da descarga atmosférica;

b) ZPR 0_B: zona protegida contra queda direta, mas onde a ameaça é o campo eletromagnético total da descarga atmosférica. Os sistemas internos podem estar sujeitos à corrente parcial da descarga atmosférica;

c) ZPR 1: zona onde a corrente de surto é limitada por uma divisão da corrente da descarga atmosférica e pela aplicação de interfaces isolantes e/ou DPS na fronteira. Uma blindagem espacial pode atenuar o campo eletromagnético da descarga atmosférica;

d) ZPR 2, ..., n: zona onde a corrente de surto pode ser ainda mais limitada por uma divisão da corrente da descarga atmosférica e pela aplicação de interfaces isolantes e/ou de DPS adicionais na fronteira. Uma blindagem espacial adicional pode ser usada para atenuar ainda mais o campo eletromagnético da descarga atmosférica.

NOTA 1 Em geral, quanto maior o número de uma ZPR em particular, tanto menor serão os parâmetros do meio eletromagnético.

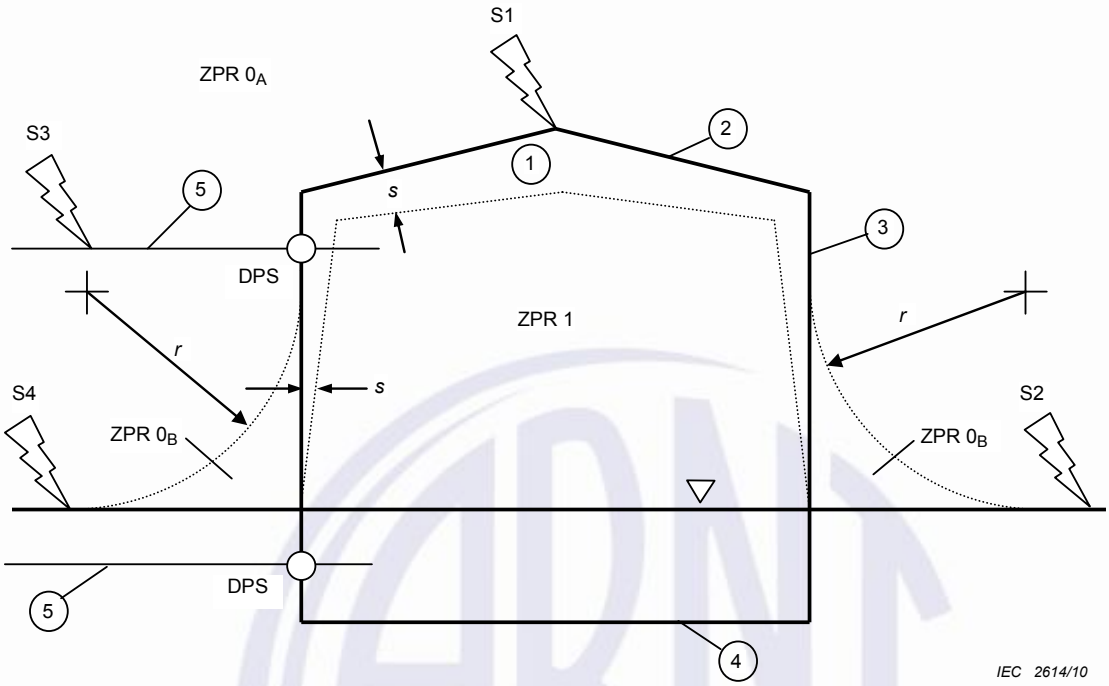
Como regra geral de proteção, a estrutura a ser protegida deve estar em uma ZPR cujas características eletromagnéticas sejam compatíveis com sua capacidade de suportar solicitações que, de outra forma, causariam danos (dano físico ou falha de sistemas elétricos e eletrônicos devido a sobretensões).

NOTA 2 Para grande parte dos sistemas e aparelhos elétricos e eletrônicos a informação sobre níveis de suportabilidade pode ser fornecida pelo fabricante.

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]



1	estrutura	S1	descarga atmosférica na estrutura
2	subsistema de captação	S2	descarga atmosférica perto da estrutura
3	subsistema de descida	S3	descarga atmosférica em linhas ou tubulações que adentram na estrutura
4	subsistema de aterramento	S4	descarga atmosférica perto de linhas ou tubulações que adentram na estrutura
5	linhas e tubulações que adentram na estrutura	*r*	raio da esfera rolante
		s	distância de segurança contra centelhamento perigoso

▽ nível do piso

◯ ligação equipotencial por meio de DPS

ZPR 0_A	descarga atmosférica direta, corrente total
ZPR 0_B	é pouco provável a ocorrência de descarga atmosférica direta, corrente parcial da descarga atmosférica ou corrente induzida
ZPR 1	não há descarga atmosférica direta, corrente limitada da descarga atmosférica ou corrente induzida

É importante observar que o volume protegido na ZPR 1 sempre respeita a distância de segurança *s*

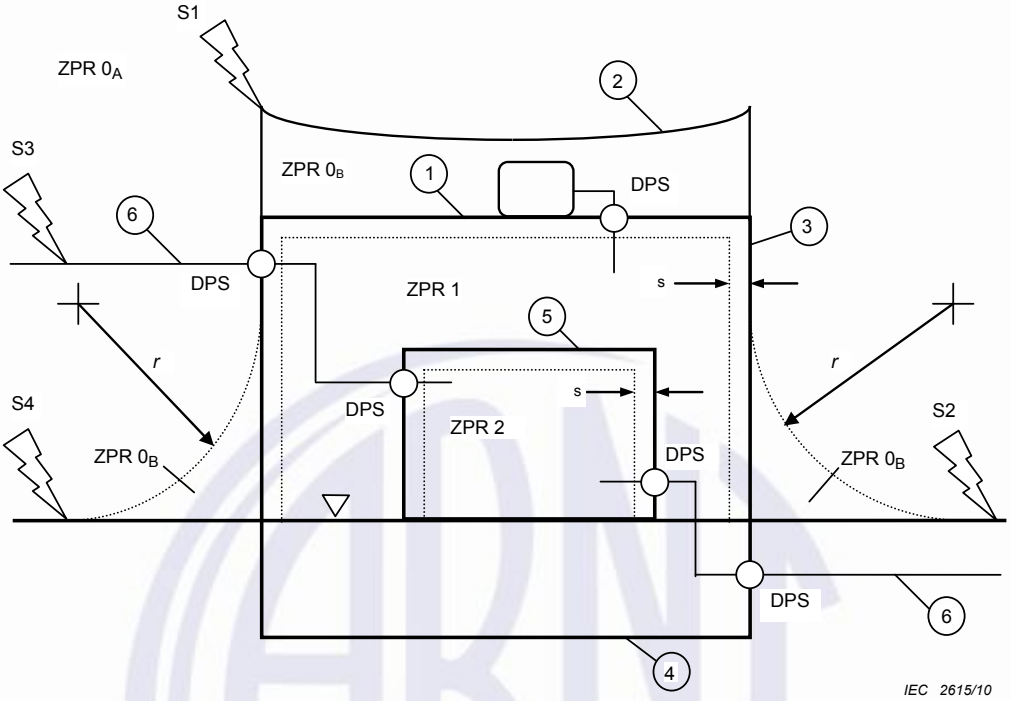
Figura 3 – ZPR definidas por um SPDA (ABNT NBR 5419-3)

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]



1	estrutura (blindagem da ZPR 1)	S1	descarga atmosférica na estrutura
2	subsistema de captação	S2	descarga atmosférica perto da estrutura
3	subsistema de descida	S3	descarga atmosférica em linhas ou tubulações que adentram na estrutura
4	subsistema de aterramento	S4	descarga atmosférica perto de linhas ou tubulações que adentram na estrutura
5	recinto (blindagem da ZPR 2)	*r*	raio da esfera rolante
6	linhas e tubulações que adentram na estrutura	s	distância de segurança contra campo magnético muito elevado

▽ nível do piso

○ ligação equipotencial para descargas atmosféricas, por meio de DPS

ZPR 0_A	descarga atmosférica direta, corrente total da descarga atmosférica, campo magnético total
ZPR 0_B	é pouco provável a ocorrência de descarga atmosférica, direta, corrente parcial da descarga atmosférica, ou corrente induzida, campo magnético total
ZPR 1	não há descarga atmosférica direta, corrente limitada da descarga atmosférica, ou corrente induzida, campo magnético atenuado
ZPR 2	não há descarga atmosférica direta, correntes induzidas, campo magnético ainda mais atenuado

É importante observar que os volumes protegidos na ZPR 1 e na ZPR 2 devem respeitar as distâncias de segurança s

Figura 4 – ZPR definidas por MPS (ABNT NBR 5419-4)

8.4 Proteção de estruturas

8.4.1 Proteção para reduzir danos físicos e risco de vida

A estrutura a ser protegida deve estar em uma ZPR 0_B ou superior. Isto é conseguido por meio de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA).

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

8.4.1.1 Um SPDA consiste em:

a) um sistema externo de proteção contra descargas atmosféricas e

b) um sistema interno de proteção contra descargas atmosféricas.

8.4.1.2 As funções do SPDA externo são:

a) interceptar uma descarga atmosférica para a estrutura (com um subsistema de captação);

b) conduzir a corrente da descarga atmosférica seguramente para a terra (com um subsistema de descida);

c) dispersar esta corrente na terra (com um subsistema de aterramento).

A função do SPDA interno é evitar centelhamento perigoso na estrutura, utilizando a ligação equipotencial ou a distância de segurança *s* (e, consequentemente, isolação elétrica), entre os componentes do SPDA e outros elementos condutores internos à estrutura.

Quatro classes de SPDA (I, II, III e IV) são definidas como um conjunto de regras de construção, baseadas nos correspondentes níveis de proteção (NP). Cada conjunto inclui regras dependentes do nível de proteção (por exemplo, raio da esfera rolante, largura da malha etc) e regras independentes do nível de proteção (por exemplo, seções transversais de cabos, materiais etc).

8.4.1.3 Onde as resistividades superficiais do solo externo e a do piso interno à estrutura forem baixas, o risco de vida devido a tensões de passo e toque pode ser reduzido:

a) externamente à estrutura, por isolação das partes condutivas expostas, por equipotencialização no nível do solo por meio de aterramento com malhas, por avisos de advertência e por restrições físicas;

b) internamente à estrutura, por ligação equipotencial de tubulações e linhas elétricas que adentram na estrutura, no ponto de entrada.

8.4.1.4 O SPDA deve estar conforme os requisitos da ABNT NBR 5419-3.

8.4.2 Proteção para reduzir as falhas de sistemas internos

A proteção contra LEMP para reduzir o risco de falha de sistemas internos deve limitar:

a) sobretensões devido a descargas atmosféricas na estrutura, resultando de acoplamento resistivo e indutivo;

b) sobretensões devido a descargas atmosféricas perto da estrutura, resultando de acoplamento indutivo;

c) sobretensões transmitidas por linhas que adentram a estrutura, devido a descargas atmosféricas diretas nas linhas ou próximas a estas;

d) campo magnético acoplado diretamente aos aparelhos.

NOTA Falhas de aparelhagem devidas a campos eletromagnéticos radiados diretamente nos equipamentos são desprezíveis contanto que a aparelhagem esteja conforme com os requisitos de emissão e imunidade a campos eletromagnéticos radiados, definidos pelas normas pertinentes de compatibilidade eletromagnética (EMC) (ver também ABNT NBR 5419-2 e ABNT NBR 5419-4).

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

O sistema a ser protegido deve estar localizado dentro de uma ZPR 1 ou superior. Isto é conseguido por meio de medidas de proteção contra surtos (MPS) aplicadas aos sistemas elétricos e eletrônicos, as quais consistem em blindagens magnéticas que atenuam o campo magnético indutor e/ou por meio de encaminhamento adequado da fiação, que reduz os laços sujeitos à indução. Uma ligação equipotencial deve ser provida nas fronteiras de uma ZPR, para partes metálicas e sistemas que cruzam estas fronteiras. Esta ligação equipotencial pode ser executada por meio de condutores de equipotencialização ou, quando necessário, por dispositivos de proteção contra surtos (DPS).

As medidas de proteção para qualquer ZPR devem estar em conformidade com a ABNT NBR 5419-4.

Uma eficiente proteção contra sobretensões que causam falhas de sistemas internos pode ser também obtida por meio de interfaces isolantes e/ou por um arranjo de DPS coordenados, que limitam estas sobretensões a valores abaixo da tensão nominal suportável de impulso do sistema a ser protegido.

As interfaces isolantes e os DPS devem ser selecionados e instalados de acordo com os requisitos da ABNT NBR 5419-4.

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Anexo A
(informativo)

Parâmetros da corrente das descargas atmosféricas

A.1 Descarga atmosférica para a terra

A.1.1 Existem dois tipos básicos de descargas atmosféricas:

a) descargas atmosféricas descendentes iniciadas por um líder descendente, da nuvem para a terra;

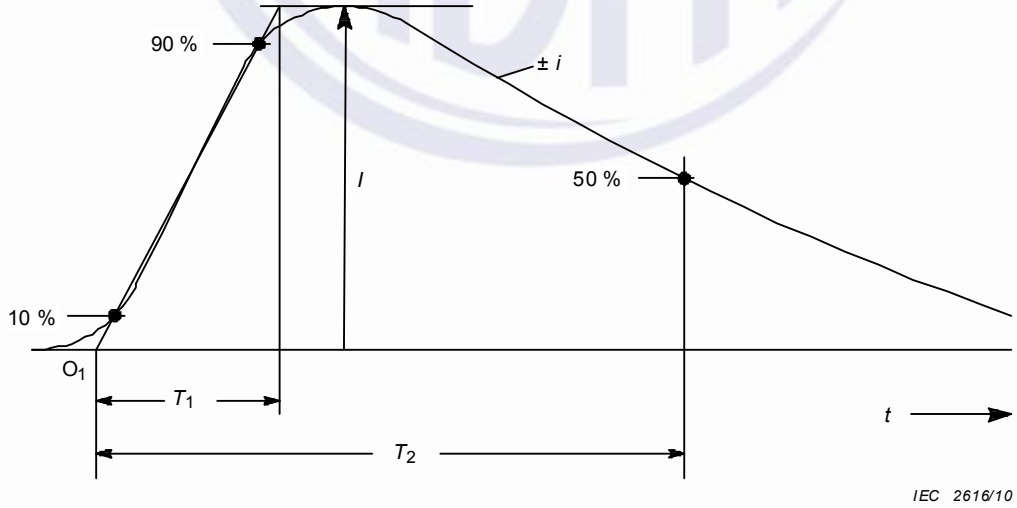
b) descargas atmosféricas ascendentes iniciadas por um líder ascendente, de uma estrutura aterrada para a nuvem.

Na maioria das vezes, as descargas atmosféricas descendentes ocorrem em locais planos e em estruturas mais baixas, enquanto que, para estruturas mais altas, as descargas atmosféricas ascendentes tornam-se predominantes. Com a altura real, a probabilidade de uma descarga atmosférica direta na estrutura aumenta (ver ABNT NBR 5419-2:2015, Anexo A) e as condições físicas mudam.

A.1.2 A corrente de descarga atmosférica consiste em um ou mais componentes diferentes:

a) impulsos com duração inferior a 2 ms (Figura A.1);

b) componentes longos com duração superior a 2 ms (Figura A.2).



Legenda

O_1 origem virtual

I corrente de pico

T_1 tempo de frente

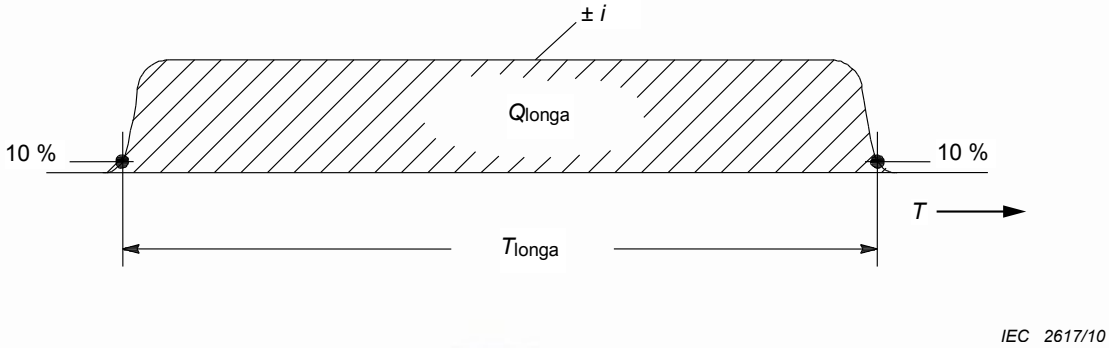
T_2 tempo até o meio valor

Figura A.1 – Definições dos parâmetros de um impulso de corrente (tipicamente T_2 < 2 ms)

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]



Legenda

T_{longa} tempo de duração

Q_{longa} carga da componente longa da descarga atmosférica

Figura A.2 – Definições dos parâmetros da componente longa (tipicamente 2 ms < T_{longa} < 1 s)

Uma diferenciação complementar das componentes das descargas atmosféricas provém de suas polaridades (positiva ou negativa) e de suas posições durante a descarga atmosférica (primeira componente, componente subsequente e superposta). As componentes possíveis são indicadas na Figura A.3 para descargas atmosféricas descendentes e na Figura A.4 para as ascendentes.

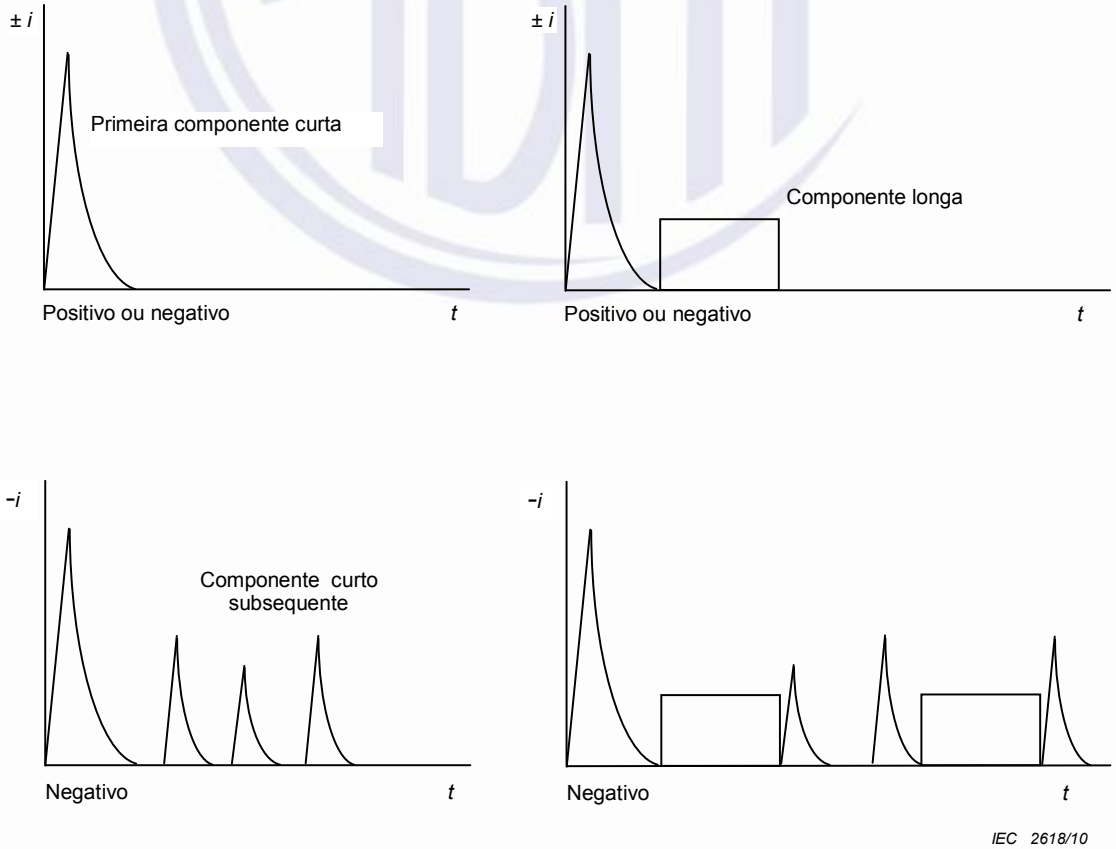


Figura A.3 – Possíveis componentes de descargas atmosféricas descendentes (típicas em locais planos e em estruturas baixas)

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

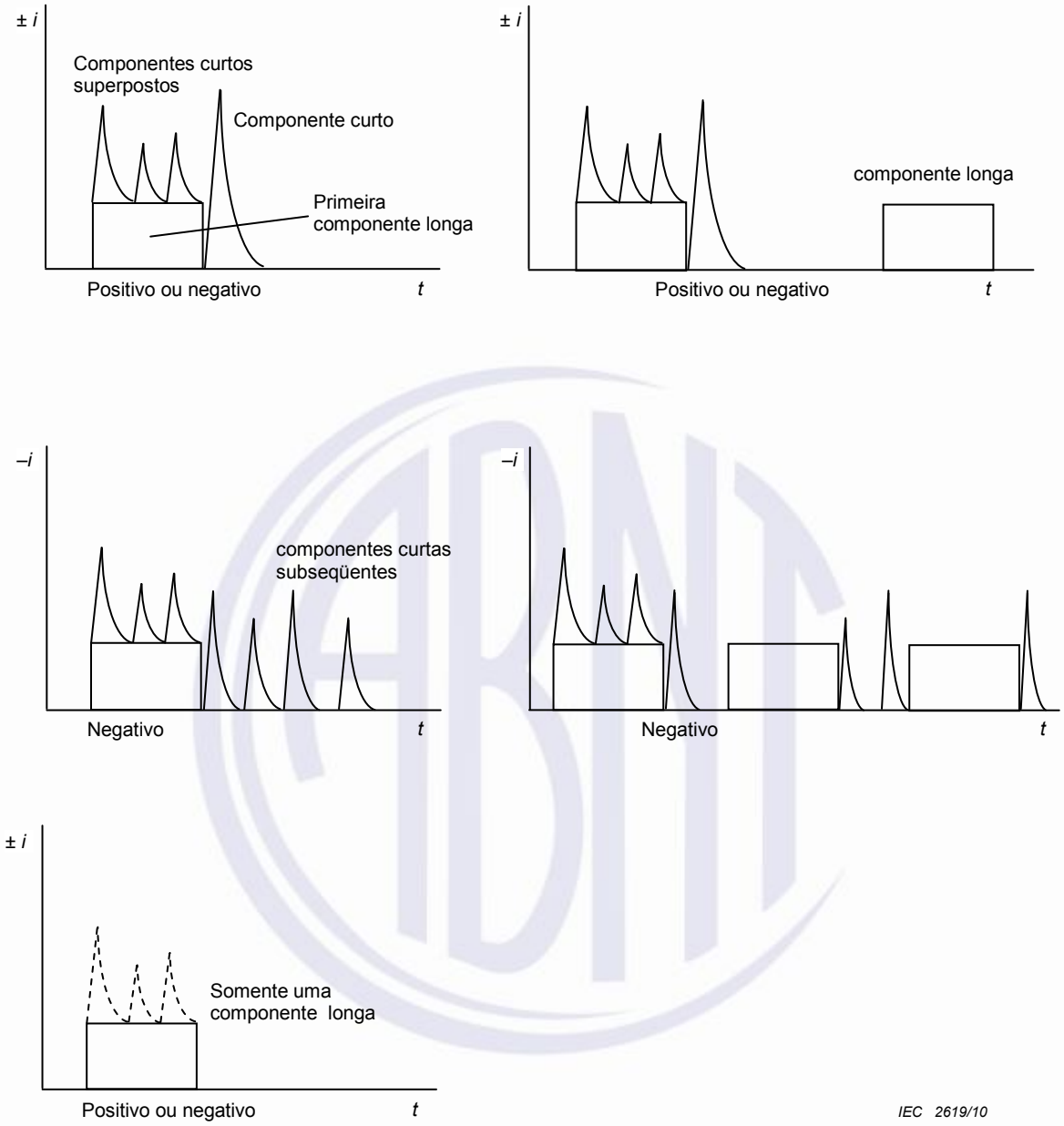


Figura A.4 – Possíveis componentes de descargas atmosféricas ascendentes (típicas de estruturas mais altas ou expostas)

A componente adicional nas descargas atmosféricas ascendentes é a primeira componente longa, com ou sem impulsos superpostos (até algo em torno de dez impulsos). Mas todos os parâmetros de um impulso de corrente de uma descarga atmosférica ascendente são inferiores àqueles das descargas atmosféricas descendentes. Uma carga superior de uma componente longa de descargas atmosféricas ascendentes não foi confirmada até a revisão desta Norma. Desta forma, os parâmetros da corrente de descargas atmosféricas ascendentes são considerados cobertos pelos valores máximos das descargas atmosféricas descendentes. Uma avaliação mais precisa dos parâmetros da corrente de descargas atmosféricas e da dependência destes parâmetros com relação à altura estão em estudo, tanto para descargas atmosféricas descendentes como para ascendentes.

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

A.2 Parâmetros da corrente da descarga atmosférica

Os parâmetros da corrente da descarga atmosférica na ABNT NBR 5419 são baseados nos resultados do "*International Council on Large Electrical Systems* (CIGRE)" fornecidos na Tabela A.1. A distribuição estatística destes parâmetros pode ser assumida como sendo a distribuição logarítmica normal. O valor médio μ e a dispersão σ_{log} correspondentes constam na Tabela A.2, e a função de distribuição é apresentada na Figura A.5. Com base nisto, a probabilidade de ocorrência de qualquer valor de cada parâmetro pode ser determinada.

Uma relação de polaridade de 10 % de descargas atmosféricas positivas e 90 % negativas é assumida. A relação de polaridade é função do local. Se nenhuma informação é disponível, é recomendada a relação fornecida.

Os valores da probabilidade de ocorrência de valores de pico da corrente de descarga atmosférica que excedem os valores previamente considerados estão descritos na Tabela A.3.

Tabela A.1 – Valores tabulados dos parâmetros da corrente das descargas atmosféricas obtidos do CIGRE (Electra No. 41 ou No. 69*) [20], [21]

Parâmetro	Valor fixado para NP I	Valores			Tipo de componente da descarga atmosférica	Linha na Figura A.5
		95 %	50 %	5 %		
I (kA)		4[a]	20[a]	90	Primeira curta negativa[b]	1A+1B
	50	4,9	11,8	28,6	Subsequente negativa curta[b]	2
	200	4,6	35	250	Primeira curta positiva (singela)	3
Q_{flash} (C)		1,3	7,5	40	Descarga atmosférica negativa	4
	300	20	80	350	Descarga atmosférica positiva	5
Q_{curta} (C)		1,1	4,5	20	Primeira curta negativa	6
		0,22	0,95	4	Subsequente negativa curta	7
	100	2	16	150	Primeira curta positiva (singela)	8
W/R (kJ/Ω)		6	55	550	Primeira curta negativa	9
		0,55	6	52	Subsequente curta negativa	10
	10 000	25	650	15 000	Primeira curta positiva	11
d*i*/d*t*máx (kA/µs)		9,1	24,3	65	Primeira curta negativa[b]	12
		9,9	39,9	161,5	Subsequente curta negativa[b]	13
	20	0,2	2,4	32	Primeira curta positiva	14
d*i*/d$t_{30/90\ \%}$ (kA/µs)	200	4,1	20,1	98,5	Subsequente curta negativa[b]	15
Q_{longa} (C)	200				Longa	
T_{longa} (s)	0,5				Longa	
Duração da frente de onda (µs)		1,8	5,5	18	Primeira curta negativa	
		0,22	1,1	4,5	Subsequente curta negativa	
		3,5	22	200	Primeira curta positiva (singela)	
Duração da componente (µs)		30	75	200	Primeira curta negativa	
		6,5	32	140	Subsequente curta negativa	
		25	230	2 000	Primeira curta positiva (singela)	

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Tabela A.1 (continuação)

Parâmetro	Valor fixado para NP I	Valores			Tipo de componente da descarga atmosférica	Linha na Figura A.5
		95 %	50 %	5 %		
Intervalo de tempo (ms)		7	33	150	Múltiplos negativos	
Duração total da descarga atmosférica (ms)		0,15	13	1 100	descarga atmosférica negativa	
		31	180	900	descarga atmosférica negativa (sem o impulso singelo)	
		14	85	500	descarga atmosférica positiva	

[a] Os valores $I = 4$ kA e $I = 20$ kA correspondem às probabilidades de 98 % e 80 %, respectivamente.
[b] Parâmetros e valores relevantes descritos na Electra Nº 69 [21].

Tabela A.2 – Distribuição logarítmica normal dos parâmetros da corrente das descargas atmosféricas – Média μ e dispersão $\sigma_{\log}$ calculados para 95 % e 5 % dos valores a partir do CIGRE (Electra No. 41 ou No. 69) [20], [21]

Parâmetro	Média μ	Dispersão $\sigma_{\log}$	Tipo de componente da descarga atmosférica	Linha na Figura A.5
I (kA)	(61,1)	0,576	Primeira curta negativa (80 %)[b]	1A
	33,3	0,263	Primeira curta negativa (80 %)[b]	1B
	11,8	0,233	Subsequente curta negativa[b]	2
	33,9	0,527	Primeira curta positiva (singela)	3
Q_{flash} (C)	7,21	0,452	descarga atmosférica negativa	4
	83,7	0,378	descarga atmosférica positiva	5
Q_{curta} (C)	4,69	0,383	Primeira curta negativa	6
	0,938	0,383	Subsequente curta negativa	7
	17,3	0,570	Primeira curta positiva (singela)	8
W/R (kJ/Ω)	57,4	0,596	Primeira curta negativa	9
	5,35	0,600	Subsequente curta negativa	10
	612	0,844	Primeira curta positiva	11
$di/dt_{máx}$ (kA/μs)	24,3	0,260	Primeira curta negativa[b]	12
	40,0	0,369	Subsequente curta negativa[b]	13
	2,53	0,670	Primeira curta positiva	14
$di/dt_{30/90\ \%}$ (kA/μs)	20,1	0,420	Subsequente curta negativa[b]	15
Q_{longa} (C)	200		Longa	
T_{longa} (s)	0,5		Longa	
Duração da frente de onda (μs)	5,69	0,304	Primeira curta negativa	
	0,995	0,398	Subsequente curta negativa	
	26,5	0,534	Primeira curta positiva (singela)	
Duração da componente da descarga atmosférica (μs)	77,5	0,250	Primeira curta negativa	
	30,2	0,405	Subsequente curta negativa	

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Tabela A.2 (continuação)

Parâmetro	Média μ	Dispersão σ_{log}	Tipo de componente da descarga atmosférica	Linha na Figura A.5
	224	0,578	Primeira curta positiva (singela)	
Intervalo de tempo (ms)	32,4	0,405	Múltiplas negativas	
Duração total da descarga atmosférica (ms)	12,8	1,175	Descarga atmosférica negativa (todos os tipos)	
	167	0,445	Descarga atmosférica negativa (sem o impulso singelo)	
	83,7	0,472	Descarga atmosférica positiva	

a $\sigma_{log} = \log(X_{16\,\%}) - \log(X_{50\,\%})$, onde *X* é o valor do parâmetro.

b Parâmetros e valores relevantes descritos na Electra Nº 69 [21].

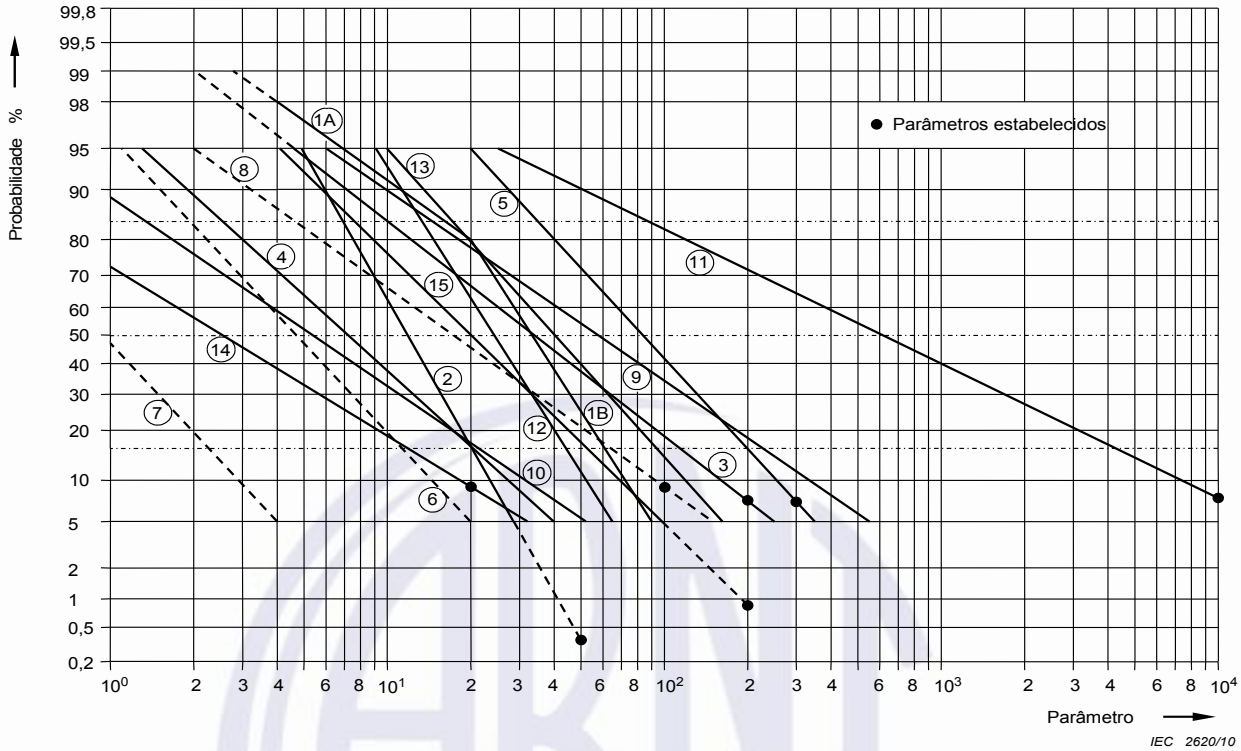
Tabela A.3 – Valores da probabilidade *P* em função da corrente *I* da descarga atmosférica

I (kA)	*P*
0	1
3	0,99
5	0,95
10	0,9
20	0,8
30	0,6
35	0,5
40	0,4
50	0,3
60	0,2
80	0,1
100	0,05
150	0,02
200	0,01
300	0,005
400	0,002
600	0,001

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]



NOTA Para a numeração das curvas, ver Tabelas A.1 e A.2.

Figura A.5 – Distribuição cumulativa de frequência dos parâmetros das correntes das descargas atmosféricas (linhas com valores de 95 % a 5 %)

Todos os valores estabelecidos para os níveis de proteção NP fornecidos nesta Norma referem-se tanto a descargas atmosféricas ascendentes como descendentes.

NOTA Os valores dos parâmetros das descargas atmosféricas são geralmente obtidos por medições efetuadas em estruturas de grande altura. A distribuição estatística dos valores de pico da corrente de descarga atmosférica, sem considerar o efeito das estruturas de grande altura, pode ser obtida de estimativas dos sistemas de localização de descargas atmosféricas.

A.3 Estabelecendo os parâmetros máximos da corrente de descarga atmosférica para o nível de proteção NP I

A.3.1 Impulso positivo

Os efeitos mecânicos das descargas atmosféricas estão relacionados com a corrente de pico (*I*) e com a energia específica (*W/R*). Os efeitos térmicos estão relacionados com a energia específica (*W/R*) quando ocorre um acoplamento resistivo e com a carga (*Q*) quando ocorrem centelhamentos na instalação. Sobretensões e centelhamentos perigosos causados por acoplamento indutivo estão relacionados com a taxa média de inclinação (d*i*/d*t*) da frente de onda da corrente da descarga atmosférica.

Os parâmetros individuais *I, Q, W/R*, d*i*/d*t* tendem a ser dominantes em cada mecanismo de defeito. Recomenda-se que isto seja levado em consideração por ocasião do estabelecimento dos procedimentos de ensaios.

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

A.3.2 Impulso positivo e componente longa

Os valores I, Q e W/R relacionados com os efeitos mecânicos e térmicos são determinados a partir de descargas atmosféricas positivas, pois mesmo sendo menos frequentes, seus valores a 10 % são bem mais elevados que aqueles correspondentes aos valores para 1 % das descargas atmosféricas negativas. Da Figura A.5 (linhas 3, 5, 8, 11 e 14), os seguintes valores com probabilidades inferiores a 10 % podem ser obtidos:

a) I = 200 kA;

b) Q_{flash} = 300 C;

c) Q_{curta} = 100 C;

d) W/R = 10 MJ/Ω;

e) di/dt = 20 kA/μs.

Para um primeiro impulso positivo conforme a Figura A.1, estes valores fornecem uma primeira aproximação do tempo de frente:

$T_1 = I / (\mathrm{d}i/\mathrm{d}t) = 10\ \mu\mathrm{s}$ (T_1 é um parâmetro de interesse secundário).

Para uma componente com decaimento exponencial, as fórmulas seguintes são aplicáveis para o cálculo aproximado da carga e da energia ($T_1 << T_2$):

$Q_{curta} = (1/0{,}7) \times I \times T_2$

$W/R = (1/2) \times (1/0{,}7) \times I^2 \times T_2$

Estas fórmulas, associadas aos valores anteriormente citados, conduzem a uma primeira aproximação do tempo necessário até meio valor:

$T_2 = 350\ \mu\mathrm{s}$

Para a componente longa, sua carga pode ser aproximadamente calculada por:

$Q_{longa} = Q_{flash} - Q_{curta} = 200$ C

Sua duração, segundo a Figura A.2, pode ser estimada a partir dos dados da Tabela A.1, como:

$T_{longa} = 0{,}5$ s

A.3.3 Primeiro impulso negativo

Para alguns efeitos de acoplamento indutivo, o primeiro impulso negativo leva a tensões induzidas mais altas, por exemplo, nos cabos no interior de dutos para cabeamento feitos de concreto armado. Da Figura A.5 (linhas 1 e 12), os seguintes valores com probabilidades inferiores a 1 % podem ser utilizados:

a) $I = 100$ kA;

b) di/dt = 100 kA/μs.

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Para o primeiro impulso negativo de acordo com a Figura A.1, estes valores dão uma primeira aproximação para os seus tempos de frente de onda de:

$T_1 = I / (\mathrm{d}i/\mathrm{d}t) = 1{,}0\ \mu\mathrm{s}$

Seu tempo até o meio valor pode ser estimado da duração da primeira componente de impulsos negativos:

$T_2 = 200\ \mu\mathrm{s}$ (T_2 é um parâmetro de interesse secundário)

A.3.4 Impulso subsequente

O valor máximo da taxa média de variação da corrente d*i*/d*t*, relacionado com centelhamentos perigosos devido à acoplamento indutivo, é determinado a partir de componentes curtas subsequentes de descargas atmosféricas negativas (pois seus valores com 1 % de ocorrência são um pouco mais elevados que os valores com 1 % de ocorrência das primeiras componentes negativas ou que os valores correspondentes com 10 % de ocorrência das descargas atmosféricas positivas). A partir da Figura A.5 (linhas 2 e 15), os valores seguintes podem ser obtidos com probabilidades inferiores a 1 %:

a) $I = 50$ kA;

b) $\mathrm{d}i/\mathrm{d}t = 200$ kA/μs.

Para um impulso subsequente conforme a Figura A.1, estes valores fornecem uma primeira aproximação do tempo de frente de onda:

$T_1 = I / (\mathrm{d}i/\mathrm{d}t) = 0{,}25\ \mu\mathrm{s}$

Seu tempo até meio valor pode ser estimado da duração das componentes dos impulsos subsequentes negativos:

$T_2 = 100\ \mu\mathrm{s}$ (T_2 é um parâmetro de interesse secundário)

A.4 Estabelecendo os parâmetros mínimos da corrente das descargas atmosféricas

A eficácia de intercepção de um subsistema de captação depende dos valores mínimos dos parâmetros das correntes das descargas atmosféricas e dos raios correspondentes da esfera rolante. As fronteiras geométricas de áreas protegidas contra quedas diretas de descargas atmosféricas podem ser determinadas pelo método da esfera rolante.

Segundo o modelo eletrogeométrico, o raio da esfera rolante *r* (distância final de salto) está relacionado com o valor de pico do primeiro impulso de corrente. Em um relatório de um grupo de trabalho do IEEE, a relação é fornecida como

$$r = 10 \times I^{0{,}65} \qquad \text{(A.1)}$$

onde

r é o raio da esfera rolante, espresso em metros (m);

I é a corrente de pico, expressa em quiloampères (kA).

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Para um dado raio da esfera rolante *r*, pode ser assumido que todas as descargas atmosféricas com valores de pico maiores que o valor de pico mínimo*I*correspondente são interceptadas pelos captores naturais ou dedicados. Desta forma, a probabilidade para os valores de pico das primeiras componentes positivas e negativas, obtida da Figura A.5 (linhas 1A e 3), é assumida como sendo a probabilidade de interceptação. Levando em consideração a razão de polaridade de 10 % de descargas atmosféricas positivas e 90 % de descargas atmosféricas negativas, a probabilidade total de interceptação pode ser calculada (ver Tabela 5).

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Anexo B
(informativo)

Equação da corrente da descarga atmosférica em função do tempo para efeito de análise

As formas de onda da corrente:

a) do primeiro impulso positivo 10/350 μs;

b) do primeiro impulso negativo 1/200 μs;

c) dos impulsos negativos subsequentes 0,25/100 μs

podem ser definidas como:

$$i = \frac{I}{k} \times \frac{(t/T_1)^{10}}{1+(t/T_1)^{10}} \times exp\,(-t/T_2) \qquad \text{(B.1)}$$

onde

I é o valor de pico da corrente;

k é *o* fator de correção para o valor de pico de corrente;

t é o tempo;

T_1 é a constante de tempo de frente;

T_2 é a constante de tempo de cauda.

Para as formas de onda da corrente do primeiro impulso positivo, primeiro impulso negativo e para os impulsos negativos subsequentes para diferentes NP, são aplicados os parâmetros dados na Tabela B.1. As curvas analíticas em função do tempo são mostradas nas Figuras B.1 a B.6.

Tabela B.1 – Parâmetros para a equação B.1

Parâmetros	Primeiro impulso positivo			Primeiro Impulso negativo			Impulso negativo subsequente		
	NP			NP			NP		
	I	II	III - IV	I	II	III-IV	I	II	III-IV
I (kA)	200	150	100	100	75	50	50	37,5	25
k	0,93	0,93	0,93	0,986	0,986	0,986	0,993	0,993	0,993
T_1 (μs)	19,0	19,0	19,0	1,82	1,82	1,82	0,454	0,454	0,454
T_2 (μs)	485	485	485	285	285	285	143	143	143

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

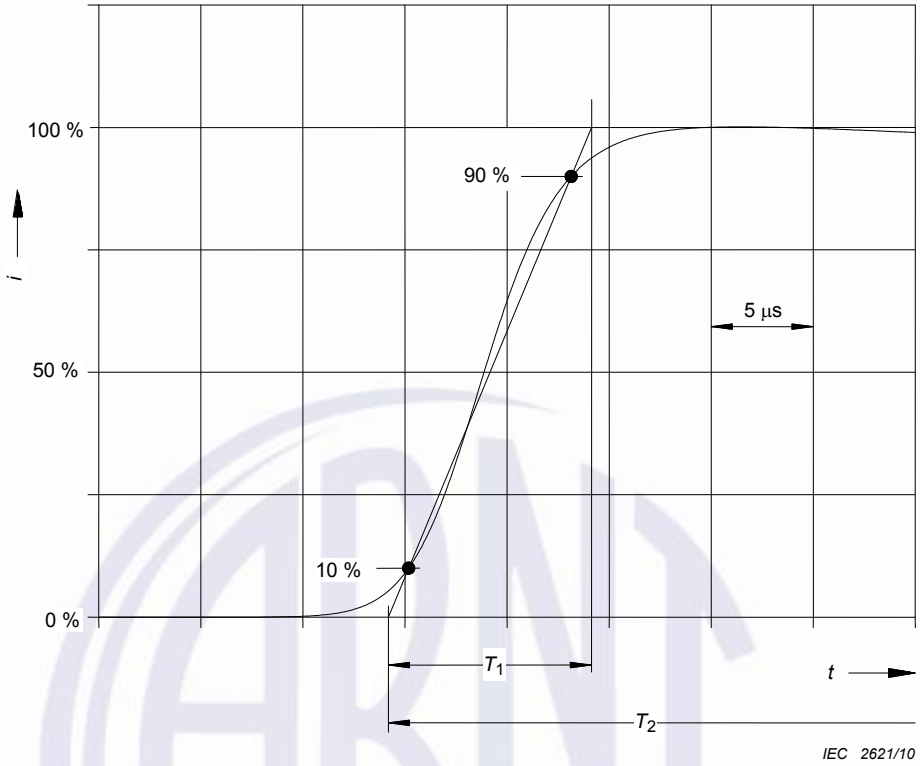


Figura B.1 – Forma de onda da elevação da corrente do primeiro impulso positivo

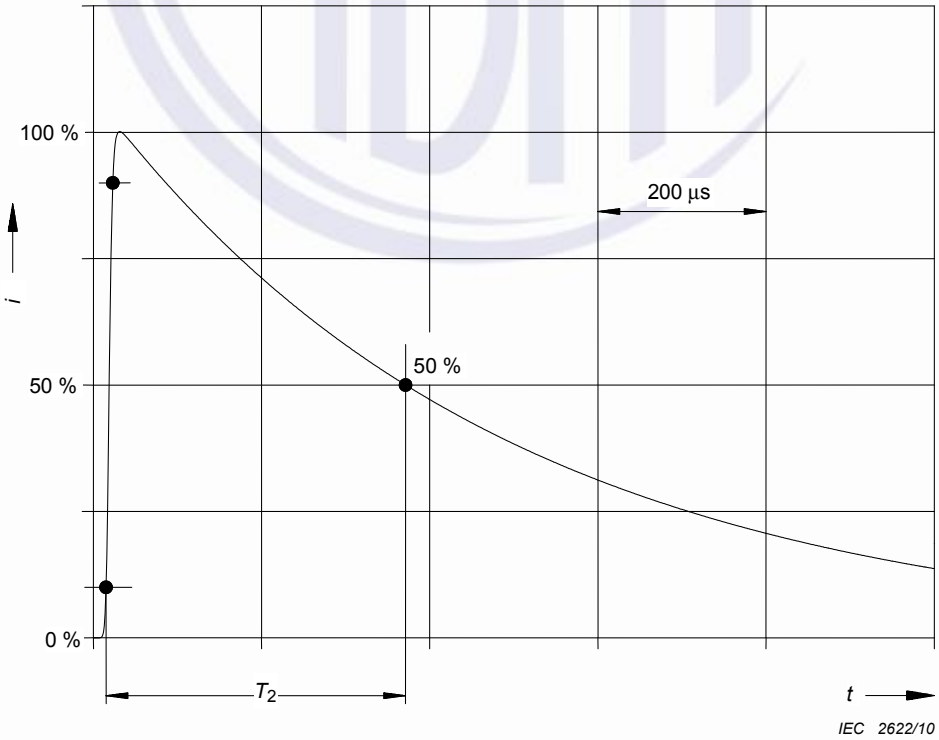


Figura B.2 – Forma de onda da cauda da corrente do primeiro impulso positivo

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

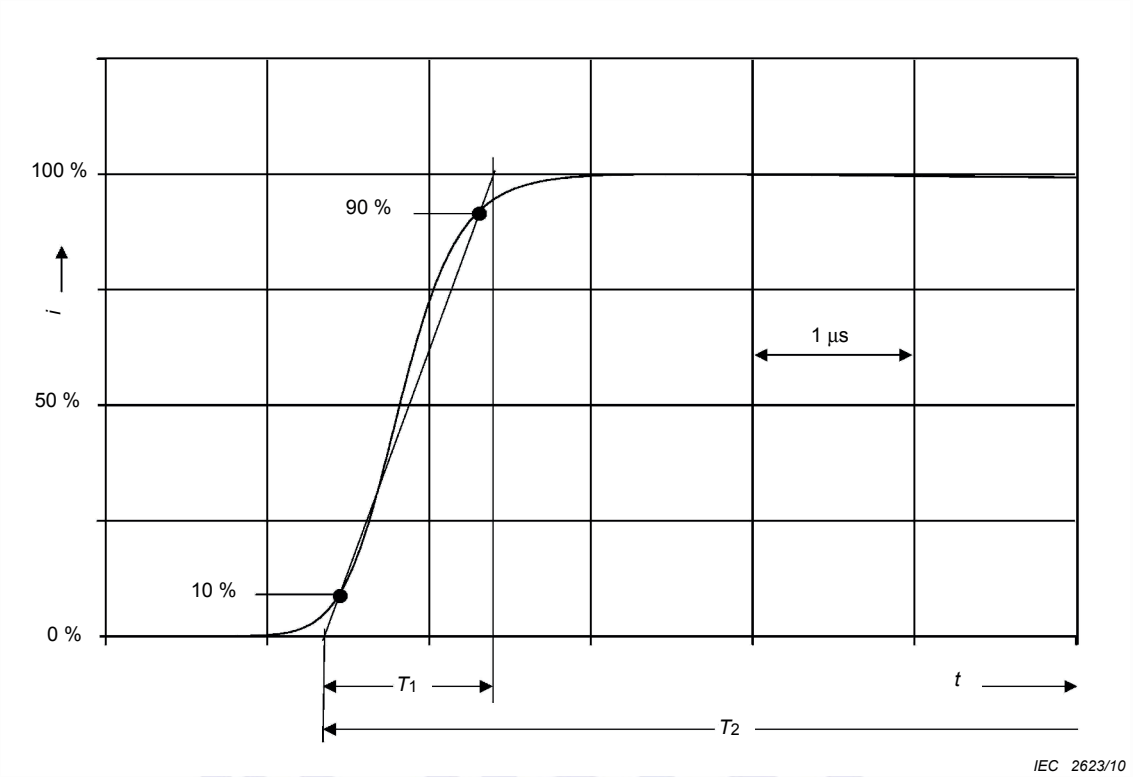


Figura B.3 – Forma de onda da elevação da corrente do primeiro impulso negativo

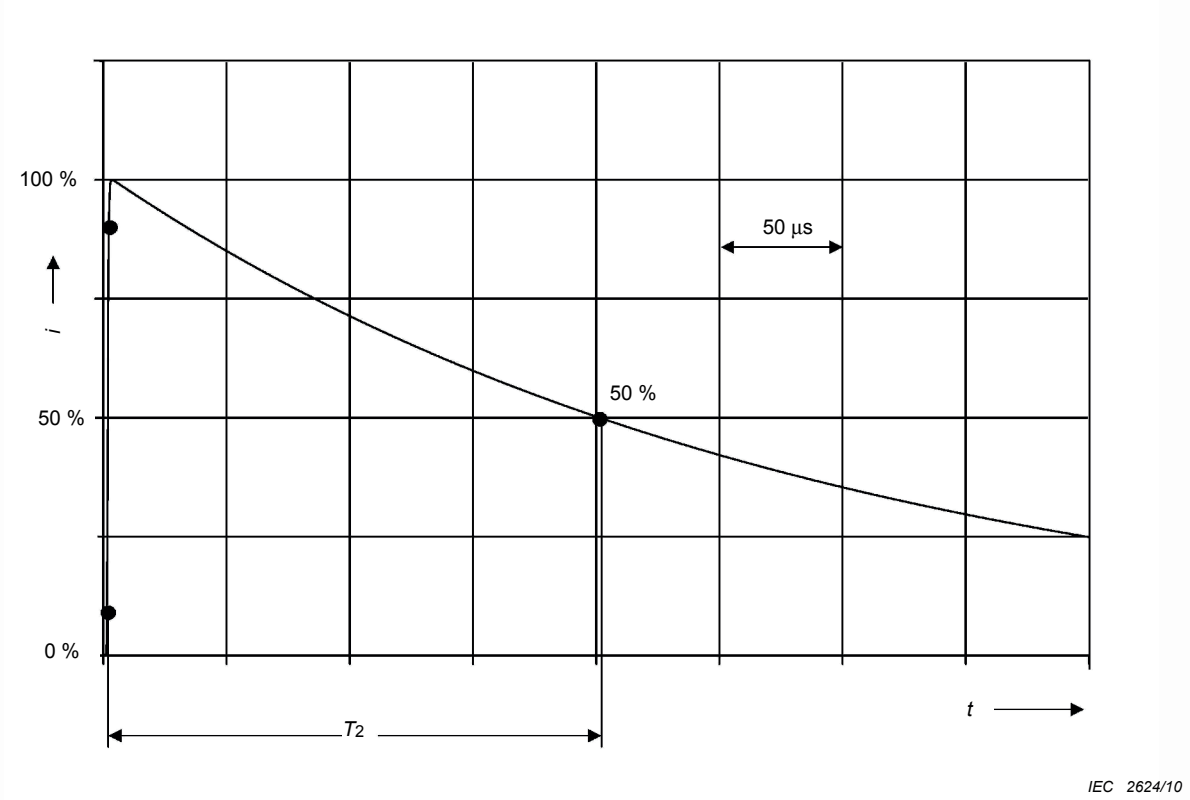


Figura B.4 – Forma de onda da cauda da corrente do primeiro impulso negativo

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

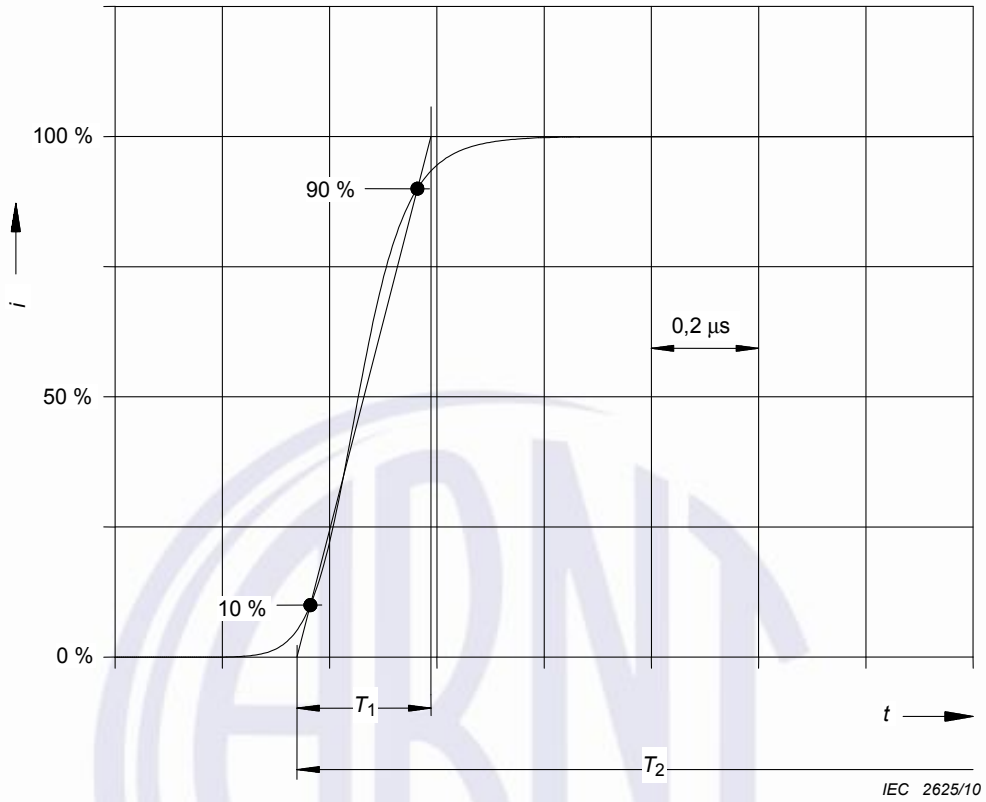


Figura B.5 – Forma de onda da elevação da corrente do impulso negativo subsequente

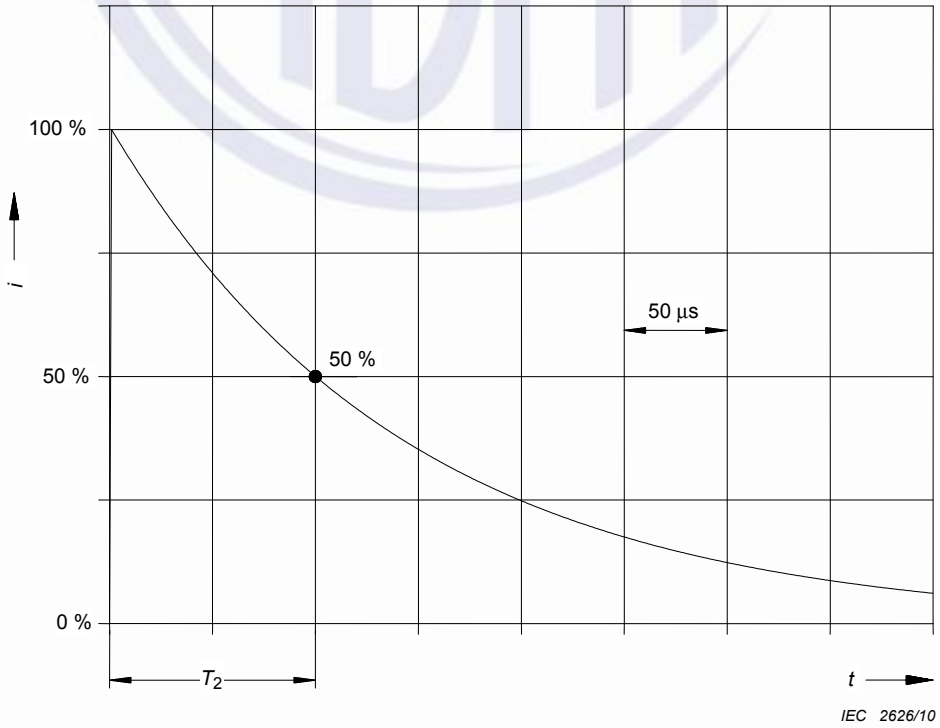


Figura B.6 – Forma de onda da cauda da corrente do impulso negativo subsequente

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

A componente longa pode ser descrita como uma forma de onda retangular com uma corrente média I e a duração T_{longa} de acordo com a Tabela 3.

A densidade da amplitude da corrente da descarga atmosférica (Figura B.7) pode ser derivada das curvas analíticas em função do tempo.

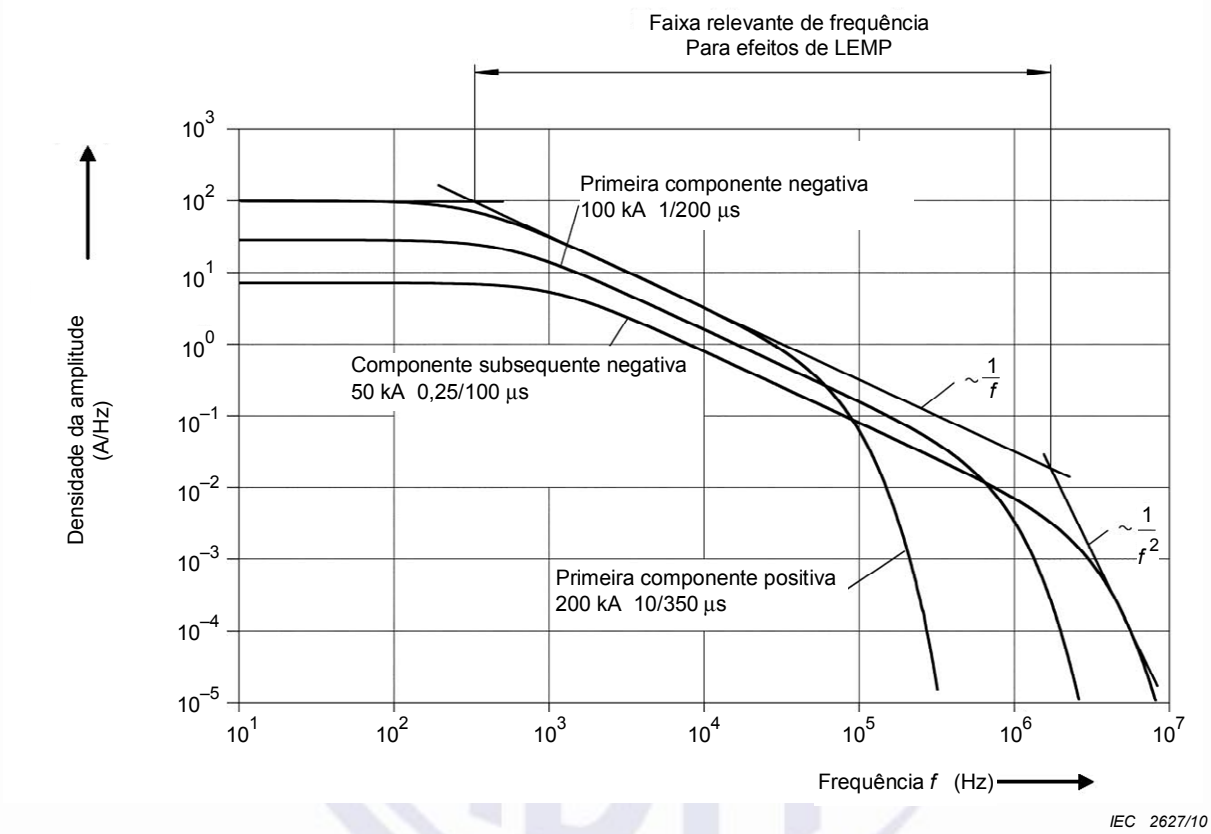


Figura B.7 – Densidade da amplitude da corrente da descarga atmosférica de acordo com o NP I

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Anexo C
(informativo)

Simulação da corrente da descarga atmosférica com a finalidade de ensaios

C.1 Geral

Se uma estrutura é atingida por uma descarga atmosférica, a corrente da descarga atmosférica é distribuída pela estrutura. Ao ensaiar componentes individuais de proteção, recomenda-se que isto seja levado em consideração por meio da escolha apropriada dos parâmetros de ensaio para cada componente. Para esta finalidade, convém que seja feita uma análise do sistema.

C.2 Simulação da energia específica do primeiro impulso positivo e da carga da componente longa

Os parâmetros de ensaios são definidos nas Tabelas C.1 e C.2, e um exemplo de gerador de ensaio é mostrado na Figura C.1, o qual pode ser utilizado para simular a energia específica do primeiro impulso positivo combinada com a carga da componente longa.

Os ensaios podem ser usados para avaliar a integridade mecânica, livre dos efeitos adversos de aquecimento e fusão.

Os parâmetros de ensaios relevantes para a simulação do primeiro impulso positivo (valor de pico de corrente I, a energia específica W/R, e a carga Q_{curta}) são dados na Tabela C.1. Recomenda-se que estes parâmetros sejam obtidos em um único impulso. Isto pode ser atingido por uma corrente com decaimento aproximadamente exponencial com T_2 na faixa de 350 µs.

Os parâmetros relevantes para a simulação da componente longa (carga Q_{longa} e duração T_{longa}) são dados na Tabela C.2.

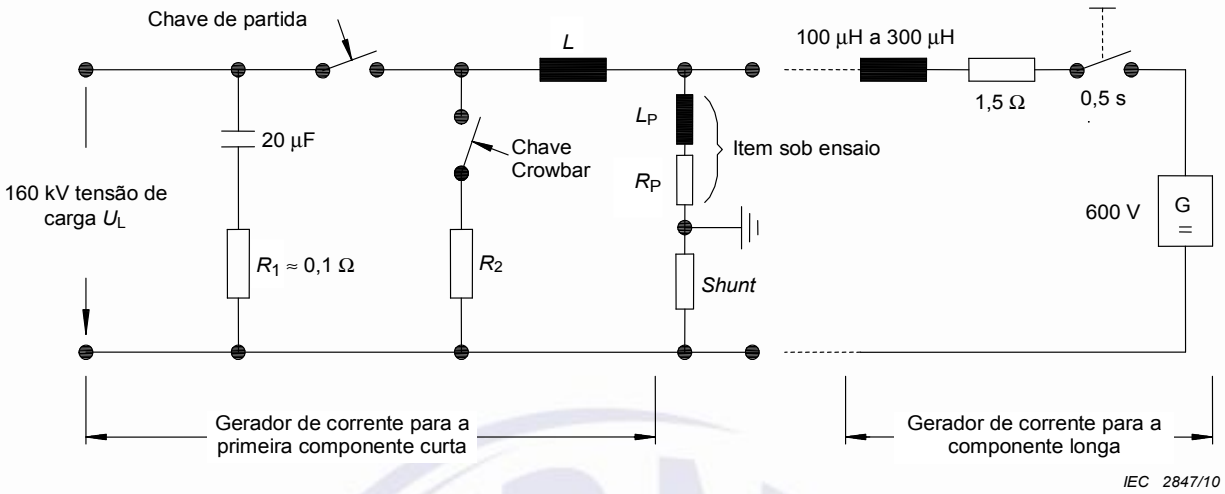
Dependendo do item sob ensaio e dos mecanismos de danos esperados, os ensaios para o primeiro impulso positivo ou para a componente longa podem ser aplicados individualmente ou como um ensaio combinado, onde a componente longa segue o primeiro impulso imediatamente. Recomenda-se que ensaios para fusão com arco sejam feitos com ambas as polaridades.

NOTA O primeiro impulso negativo não é utilizado para os propósitos de ensaios.

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]



NOTA Valores aplicáveis para NP I.

Figura C.1 – Exemplo de gerador de ensaio para simulação da energia específica do primeiro impulso positivo e da carga da componente longa

Tabela C.1 – Parâmetros de ensaios para o primeiro impulso positivo

Parâmetros de ensaio		NP			Tolerância
		I	II	III-IV	%
Valor de pico da corrente *I*	(kA)	200	150	100	± 10
Carga Q_{curta}	(C)	100	75	50	± 20
Energia específica *W/R*	(MJ/Ω)	10	5,6	2,5	± 35

Tabela C.2 – Parâmetros de ensaios para a componente longa

Parâmetros de ensaio		Nível de proteção			Tolerância
		I	II	III-IV	%
Carga Q_{longa}	(C)	200	150	100	± 20
Duração T_{longa}	(s)	0,5	0,5	0,5	± 10

C.3 Simulação da taxa de variação da frente de onda de corrente dos impulsos

A taxa de variação da corrente determina a tensão induzida magneticamente em laços instalados perto de condutores que conduzem as correntes das descargas atmosféricas.

A taxa de variação da corrente de um impulso é definida como a elevação da corrente Δi durante o tempo de elevação Δt (Figura C.2). Os parâmetros de ensaio pertinentes para a simulação desta taxa de variação de corrente são dados na Tabela C.3. Exemplos de geradores de ensaios são mostrados nas Figuras C.3 e C.4, os quais podem ser utilizados para simular a taxa de variação da frente de onda das correntes associadas às descargas atmosféricas diretas. A simulação pode ser feita para o primeiro impulso positivo e para o impulso subsequente negativo.

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

NOTA Esta simulação cobre a taxa de variação da frente de onda de corrente dos impulsos. A cauda da corrente não tem influência neste tipo de simulação.

A simulação de acordo com C.3 pode ser aplicada independentemente ou em combinação com a simulação de acordo com C.2.

Para informações adicionais sobre parâmetros de ensaios simulando os efeitos das descargas atmosféricas em componentes de SPDA, ver Anexo D.

Tabela C.3 – Parâmetros de ensaios dos impulsos

Parâmetros de ensaio	NP			Tolerância %
	I	II	III-IV	
Primeiro impulso positivo				
Δi (kA)	200	150	100	± 10
Δt (µs)	10	10	10	± 20
Impulsos subsequentes negativos				
Δi (kA)	50	37,5	25	± 10
Δt (µs)	0,25	0,25	0,25	± 20

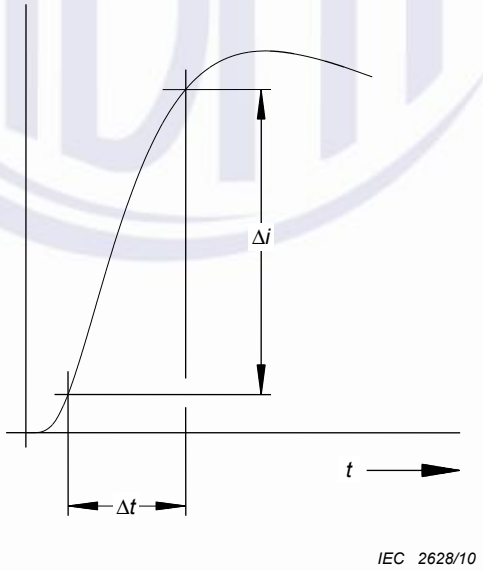
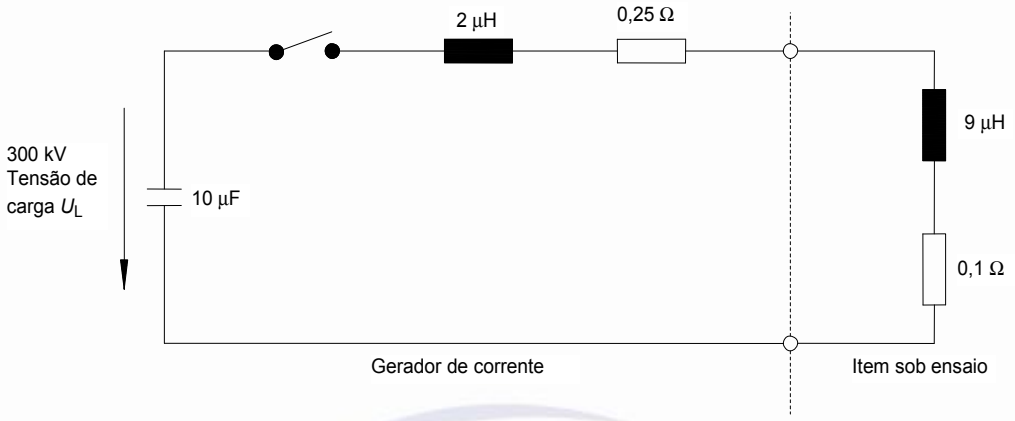


Figura C.2 – Definição para a taxa de variação da corrente de acordo com a Tabela C.3

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

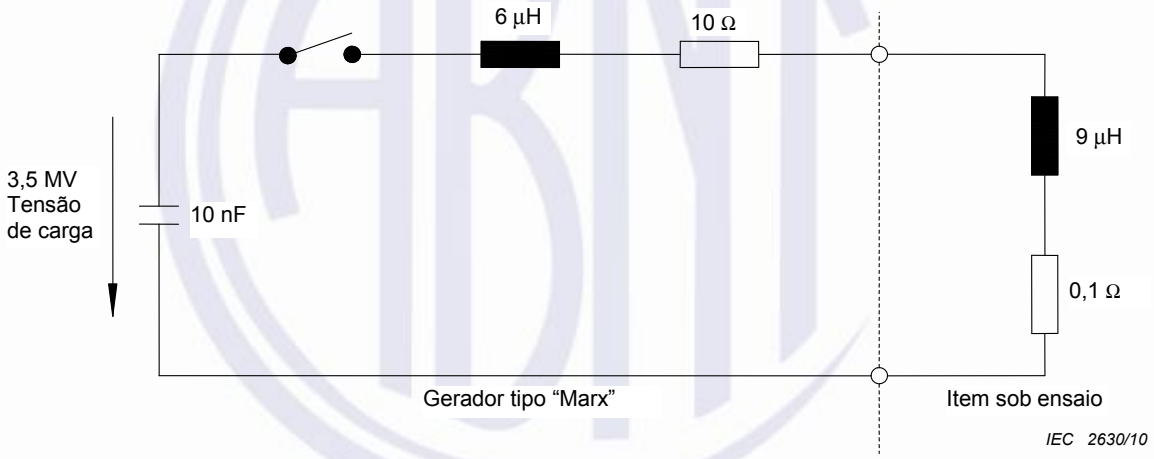
© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]



NOTA Valores aplicáveis para NP I.

Figura C.3 – Exemplo de gerador de ensaio para a simulação da taxa de variação da frente de onda do primeiro impulso positivo para itens sob ensaio de grande porte



NOTA Valores aplicáveis para NP I.

Figura C.4 – Exemplo de gerador de ensaio para a simulação da taxa de variação da frente de onda dos impulsos subsequentes negativos para itens sob ensaio de grande porte

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Anexo D
(informativo)

Parâmetros de ensaio para simular os efeitos da descarga atmosférica sobre os componentes do SPDA

D.1 Geral

Este Anexo fornece os parâmetros básicos que podem ser utilizados em laboratórios para simulação dos efeitos das descargas atmosféricas. Este Anexo cobre todos os componentes de um SPDA sujeitos a toda ou a maior parte da corrente das descargas atmosféricas, e recomenda-se que seja utilizado em conjunto com as normas que especificam os requisitos e os ensaios para cada componente específico.

NOTA Parâmetros relevantes a certos aspectos do sistema (por exemplo, a coordenação dos dispositivos de proteção contra surtos) não são considerados neste Anexo.

D.2 Parâmetros de corrente relevantes ao ponto de impacto

Os parâmetros das correntes das descargas atmosféricas que exercem maior influência na integridade física de um SPDA são, em geral, o valor de pico da corrente I, a carga Q, a energia específica W/R, a duração T e a taxa de variação média da corrente $\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$. Cada parâmetro tende a dominar diferentes mecanismos de falha, como analisado em detalhe nas seções seguintes. Os parâmetros de corrente a serem considerados para ensaios são combinações destes valores, selecionados para representar, em laboratório, o mecanismo de falha real da parte do SPDA sob ensaio. Os critérios para a seleção das grandezas importantes são dados em D.5.

A Tabela D.1 apresenta os valores máximos de I, Q, W/R, T e $\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$ a serem considerados para ensaios em função do nível de proteção requerido.

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Tabela D.1 – Resumo dos parâmetros da descarga atmosférica a serem considerados nos cálculos dos valores de ensaio para diferentes componentes do SPDA e para diferentes níveis de proteção

Componente	Problema principal	Parâmetros das descargas atmosféricas					Notas
Captação	Erosão no ponto de impacto (por exemplo, chapas metálicas finas)	NP	Q_{longa} [C]	*T*			
		I II III - IV	200 150 100	< 1 s (aplicar Q_{longa} em um pulso único)			
Captação e descidas	Aquecimento ôhmico	NP	*W/R* [kJ/Ω]	*T*			Um dimensionamento conforme conforme a ABNT NBR 5419-3 toma estes ensaios supérfluos
		I II III - IV	10 000 5 600 2 500	Aplicar *W/R* em uma configuração adiabática			
	Efeitos mecânicos	NP	*I* [kA]	*W/R* [kJ/Ω]			
		I II III - IV	200 150 100	10 000 5 600 2 500			
Componentes de conexão	Efeitos combinados (térmicos, mecânicos e de arco)	NP	*I* [kA]	*W/R* [kJ/Ω]	*T*		
		I II III - IV	200 150 100	10 000 5 600 2 500	< 2 ms (aplicar *I* e *W/R* em um pulso único)		
Aterramento	Erosão no eletrodo de aterramento	NP	Q_{longa} [C]	*T*			Dimensionamento geralmente determinado por aspectos mecânicos e químicos (corrosão etc.)
		I II III - IV	200 150 100	< 1 s (aplicar Q_{longa} em pulso único)			

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Tabela D.1 (continuação)

Componente	Problema principal	Parâmetros das descargas atmosféricas					Notas
DPS contendo centelhador	Efeitos combinados (térmicos, mecânicos e de arco)	NP	I [kA]	Q_{curta} [C]	W/R [kJ/Ω]	di/dt [kA/μs]	Aplicar I, Q_{curta} e W/R em um pulso único (duração T < 2 ms); aplicar di/dt em um pulso separado
		I	200	100	10 000	200	
		II	150	75	5 600	150	
		III - IV	100	50	2 500	100	
DPS contendo blocos de resistores de óxido metálico	Efeitos de energia (sobrecarga)	NP	Q_{curta} [C]				Ambos os aspectos necessitam ser verificados Ensaios separados podem ser considerados
		I	100				
		II	75				
		III - IV	50				
	Efeitos dielétricos (descargas disruptivas/ trincas)	NP	I [kA]	T			
		I	200	< 2 ms			
		II	150				
		III - IV	100	(aplicar I em um único pulso)			

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

D.3 Distribuição da corrente

Os parâmetros dados na Tabela D.1 são pertinentes à corrente do raio no ponto de impacto. Na realidade, a corrente flui para a terra por mais de um caminho, uma vez que, normalmente, há vários condutores de descidas e condutores naturais em um SPDA externo. Além disso, diferentes linhas e tubulações metálicas adentram uma estrutura protegida (tubulações de água e gás, linhas de energia e sinal etc.). Para a determinação dos parâmetros da corrente real fluindo em componentes específicos em um SPDA, a distribuição da corrente tem que ser levada em conta. Preferencialmente, a amplitude da corrente e a forma de onda por meio de um componente em um local específico do SPDA devem ser avaliadas. Quando uma avaliação individual não for possível, os parâmetros de corrente podem ser avaliados por meio dos seguintes procedimentos.

Para a avaliação da distribuição da corrente em um SPDA externo, deve-se adotar o fator de configuração k_c (ver ABNT NBR 5419-3:2015, Anexo C). Este fator fornece uma estimativa da distribuição da corrente da descarga atmosférica fluindo pelos condutores de descidas de um SPDA externo sob as piores condições.

Para a avaliação da distribuição da corrente na presença de partes condutoras externas e linhas de energia e sinal conectadas à estrutura protegida, devem ser adotados os valores aproximados de k_e e k'_e considerados no Anexo E.

A abordagem descrita acima é aplicável para a avaliação do valor de pico da corrente que flui por um caminho particular para a terra. O cálculo dos outros parâmetros da corrente é fornecido a seguir:

$$I_p = k \times I \tag{D.1}$$

$$Q_p = k \times Q \tag{D.2}$$

$$(W/R)_p = k^2 \times (W/R) \tag{D.3}$$

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_p = k \times \left(\frac{di}{dt}\right) \tag{D.4}$$

onde

x_p é o valor da quantidade considerada (corrente de pico I_p, carga Q_p, energia específica $(W/R)_p$, taxa de variação da corrente $(di/dt)_p$), pertinente a um caminho particular para a terra “p”;

x é o valor de uma quantidade considerada (corrente de pico I, carga Q, energia específica (W/R), taxa de variação da corrente (di/dt)), pertinente à corrente total da descarga atmosférica;

k é o fator de distribuição da corrente:

- k_c para SPDA externo (ver ABNT NBR 5419-3:2015, Anexo C)
- k_e, k'_e na presença de partes condutoras externas e linhas de energia e de telecomunicações que adentram a estrutura protegida (ver Anexo E).

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

D.4 Efeitos da corrente da descarga atmosférica e possíveis danos

D.4.1 Efeitos térmicos

Os efeitos térmicos associados às correntes da descarga atmosférica são relativos ao aquecimento resistivo causado pela circulação de corrente elétrica por meio de condutores e pelo aquecimento gerado por arcos no ponto de impacto e em todas as partes isoladas de um SPDA envolvidas no desenvolvimento de arcos (por exemplo, em centelhadores).

D.4.1.1 Aquecimento resistivo

O aquecimento resistivo aparece em qualquer componente de um SPDA conduzindo uma parte significativa da corrente da descarga atmosférica. A área mínima da seção dos condutores deve ser suficiente para prevenir sobreaquecimento dos condutores a um nível que possa representar perigo de incêndio nas imediações. Apesar dos aspectos térmicos descritos em D.4.1, a suportabilidade mecânica e os critérios de durabilidade também devem ser considerados para as partes expostas às condições atmosféricas e/ou corrosão. A avaliação do aquecimento do condutor devido à corrente da descarga atmosférica é algumas vezes necessária quando problemas possam surgir devido ao risco de ferimentos às pessoas e danos de fogo ou explosão.

A seguir, são dadas orientações para se avaliar a elevação de temperatura dos condutores submetidos às correntes da descarga atmosférica.

Uma aproximação analítica é apresentada a seguir:

A potência instantânea dissipada como aquecimento em um condutor devido à corrente elétrica é:

$$P(t) = i^2(t) \times R \tag{D.5}$$

A energia térmica gerada por um pulso completo da descarga atmosférica é, portanto, a resistência ôhmica de um caminho da descarga atmosférica por meio de um componente considerado do SPDA multiplicado pela energia específica do pulso, sendo expressa em joule ou watt × segundo.

$$W = R \times \int i^2\,(t) \times \mathrm{d}t \tag{D.6}$$

Em uma descarga atmosférica, as fases de alta energia específica da descarga atmosférica têm durações tão curtas que a geração de qualquer aquecimento na estrutura não pode ser significativamente dispersa durante o evento, sendo o fenômeno, portanto, considerado adiabático.

A temperatura dos condutores de um SPDA pode ser avaliada como a seguir:

$$\theta - \theta_0 = \frac{1}{\alpha}\left[exp\left(\frac{W/R \times \alpha \times \rho_0}{q^2 \times \gamma \times C_w}\right) - 1\right] \tag{D.7}$$

Os valores característicos dos parâmetros físicos descritos na Equação (D.7), para diferentes materiais utilizados em SPDA, são dados na Tabela D.2, onde:

$\theta - \theta_0$ é a elevação de temperatura dos condutores, expressa em kelvins (K)

α é o coeficiente de temperatura da resistência (1/K)

W/R é a energia específica do impulso de corrente, expressa em joule por ohms (J/Ω)

ρ_0 é a resistência ôhmica específica de um condutor na temperatura ambiente, expressa em ohm . metro (Ωm)

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

q é a área da seção de um condutor, expressa em metros quadrados (m^2)

γ é a densidade do material, expressa em quilogramas por metro cubico (kg/m^3)

C_w é a capacidade térmica, expressa em joule por quilograma . kelvin (J/kgK)

C_s é o calor latente da fusão, expresso em joule por quilograma (J/kg)

θ_s é a temperatura de fusão, expressa em graus Celsius (°C)

Tabela D.2 – Características físicas de materiais típicos utilizados em componentes de SPDA

Grandeza	Material			
	Alumínio	Aço doce	Cobre	Aço inoxidável [a]
ρ_0 [Ωm]	29×10^{-9}	120×10^{-9}	$17{,}8 \times 10^{-9}$	700×10^{-9}
α [1/K]	$4{,}0 \times 10^{-3}$	$6{,}5 \times 10^{-3}$	$3{,}92 \times 10^{-3}$	$0{,}8 \times 10^{-3}$
γ [kg/m^3]	2 700	7 700	8 920	8 000
θ_s [°C]	658	1 530	1 080	1 500
C_s [J/kg]	397×10^3	272×10^3	209×10^3	–
C_w [J/kgK]	908	469	385	500

[a] Material austenítico (aço de alta liga para suportar fortes desgastes por impacto produzido nos equipamentos de mineração, de construção, movimentacão de terra, etc. Em geral, o austenítico é usado só para peças fundidas de forma simples), não magnético.

A Tabela D.3 apresenta, como um exemplo de aplicação desta equação, a elevação da temperatura de condutores feitos de diferentes materiais, em função de *W*/*R* e da área da seção do condutor.

Tabela D.3 – Elevação de temperatura para condutores de diferentes seções em função de *W/R*

Seção (mm^2)	Material											
	Alumínio			Aço doce			Cobre			Aço inoxidável [a]		
	W/R (MJ/Ω)			***W/R*** (MJ/Ω)			***W/R*** (MJ/Ω)			***W/R*** (MJ/Ω)		
	2,5	**5,6**	**10**	**2,5**	**5,6**	**10**	**2,5**	**5,6**	**10**	**2,5**	**5,6**	**10**
4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
10	564	–	–	–	–	–	169	542	–	–	–	–
16	146	454	–	1120	–	–	56	143	309	–	–	–
25	52	132	283	211	913	–	22	51	98	940	–	–
50	12	28	52	37	96	211	5	12	22	190	460	940
100	3	7	12	9	20	37	1	3	5	45	100	190

[a] Material austenítico (aço de alta liga para suportar fortes desgastes por impacto produzido nos equipamentos de mineração, de construção, movimentacão de terra, etc. Em geral, o austenítico é usado só para peças fundidas de forma simples), não magnético.

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

A descarga atmosférica típica é caracterizada por uma descarga curta (tempo até o meio valor de algumas centenas de microssegundos) e um alto valor de pico de corrente. Sob tais circunstâncias, convém que o efeito pelicular também seja levado em consideração. Entretanto, na maioria dos casos práticos referentes aos componentes do SPDA, as características dos materiais (permeabilidade magnética dinâmica do condutor do SPDA) e as configurações geométricas (área da seção do condutor do SPDA) reduzem a contribuição do efeito pelicular na elevação de temperatura do condutor a níveis desprezíveis.

O componente mais importante da descarga atmosférica para este mecanismo de aquecimento é a primeira descarga de retorno.

D.4.1.2 Danos térmicos no ponto de impacto

Danos térmicos no ponto de impacto podem ser observados em todos os componentes de um SPDA nos quais o desenvolvimento de um arco acontece, isto é, nos sistemas de captação, em centelhadores etc.

A fusão e a erosão de materiais podem ocorrer no ponto de impacto. Na realidade, na região de contato entre arco e metal, há um grande aumento térmico oriundo desta região do arco, assim como uma concentração de aquecimento ôhmico em função da alta densidade de corrente no metal. A maioria da energia térmica é gerada na superfície do metal ou muito próxima a esta. O calor gerado nas proximidades da região de contato do arco excede o calor que pode ser absorvido pelo metal por condução, e o excesso é perdido na fusão ou vaporização do metal ou irradiado. A severidade do processo está relacionada à amplitude da corrente e à sua duração.

D.4.1.2.1 Geral

Vários modelos teóricos têm sido desenvolvidos para o cálculo dos efeitos térmicos no ponto de impacto do canal da descarga atmosférica em superfícies metálicas. Este documento, por motivo de simplicidade, apresenta somente o modelo de queda de tensão “anodo-catodo”. A aplicação deste modelo é particularmente efetiva para chapas de metal finas. Em todos os casos, ele fornece resultados conservativos uma vez que é postulado que toda a energia injetada no ponto de impacto do raio é utilizada para fundir ou vaporizar o material condutor, desprezando a difusão do calor no metal. Outros modelos introduzem a dependência dos danos no ponto de impacto da descarga atmosférica com a duração do impulso de corrente.

D.4.1.2.2 Modelo da queda de tensão “anodo-catodo”

Assume-se que a entrada de energia W na região de contato do arco é dada pela queda de tensão “anodo-catodo” $u_{a,c}$ multiplicada pela carga Q da corrente da descarga atmosférica:

$$W = \int_0^\infty u_{a,c}(t) \times i(t) \times dt = u_{a,c} \times \int_0^\infty |i(t)| \times dt \qquad \text{(D.8)}$$

Como $u_{a,c}$ é razoavelmente constante na faixa de corrente aqui considerada, a carga da corrente da descarga atmosférica (Q) é a principal responsável pela conversão de energia na região de contato do arco.

A queda de tensão “anodo-catodo” $u_{a,c}$ tem um valor de algumas dezenas de volts.

Em uma abordagem simplificada, assume-se que toda a energia desenvolvida na região de contato do arco é utilizada somente para a fusão. A seguinte Equação (D.9) utiliza esta suposição, mas leva a um superestimado volume de metal fundido.

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

$$V = \frac{u_{a,c} \times Q}{\gamma} \frac{1}{c_w(\theta_s - \theta_u) + c_s} \quad \text{(D.9)}$$

onde

V é o volume de metal fundido, expresso em metros cúbicos (m^3)

$u_{a,c}$ é a queda de tensão “anodo-catodo” (assumido como constante) , expressa em volts [V]

Q é a carga da corrente da descarga atmosférica, expressa em coulombs [C]

γ é a densidade do material, expressa em quilograma por metros cúbicos [kg/m^3]

C_w é a capacidade térmica, expressa em joule por quilograma . kelvin [J/kgK]

θ_s é a temperatura de fusão, expressa em graus Celsius [°C]

θ_u é a temperatura ambiente, expressa em graus Celsius [°C]

C_s é o calor latente de fusão, expressa em joules por quilogramas [J/kg]

Os valores característicos dos parâmetros físicos descritos na Equação (D.9), para diferentes materiais utilizados em SPDA, estão registrados na Tabela D.2.

Basicamente, a carga a ser considerada é a soma da carga da corrente de retorno e da corrente de continuidade. Experiências de laboratório têm mostrado que os efeitos da corrente de retorno têm menor importância se comparados com os efeitos da corrente de continuidade.

D.4.2 Efeitos mecânicos

Os efeitos mecânicos causados pela corrente da descarga atmosférica dependem da amplitude e da duração da corrente, assim como pelas características elásticas da estrutura mecânica afetada. Dependem também das forças de atrito que atuam entre as partes do SPDA em contato uma com as outras, se pertinente.

D.4.2.1 Interação magnética

Forças magnéticas ocorrem entre dois condutores conduzindo correntes ou onde um condutor conduzindo corrente forma um ângulo ou um laço.

Quando uma corrente flui por meio de um circuito, a amplitude das forças eletrodinâmicas desenvolvidas nas várias posições do circuito depende da amplitude da corrente da descarga atmosférica e da configuração geométrica do circuito. O efeito mecânico destas forças, entretanto, depende não somente das suas amplitudes, mas também da forma geral da corrente, sua duração, assim como da configuração geométrica da instalação.

D.4.2.1.1 Forças eletrodinâmicas

Forças eletrodinâmicas desenvolvidas pela corrente “*i*” fluindo por condutores paralelos por um longo trecho de comprimento *l* e distância *d* (laço longo e estreito), como mostrado na Figura D.1, podem ser calculadas aproximadamente pela equação a seguir:

$$F(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \times i^2(t) \times \frac{l}{d} = 2 \times 10^{-7} \times i^2(t) \times \frac{l}{d} \quad \text{(D.10)}$$

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

onde

F(t) é a força eletrodinâmica, expressa em newtons (N);

i é a corrente, expressa em ampères (A);

μ_0 é a permeabilidade magnética do ar ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m);

l é o comprimento dos condutores, expresso em metros (m);

d é a distância entre os trechos retos paralelos dos condutores, expressa em metros (m).

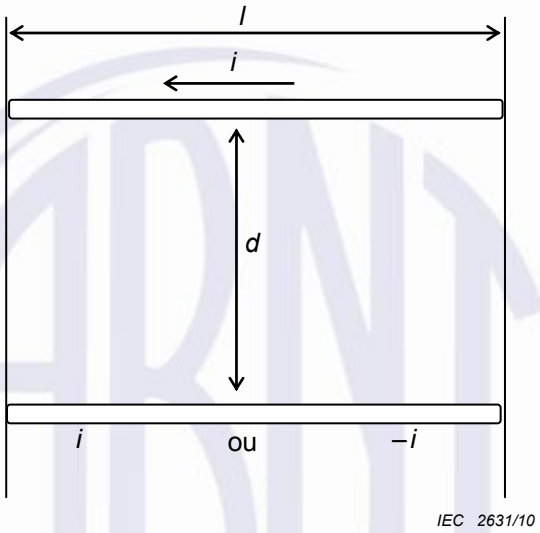
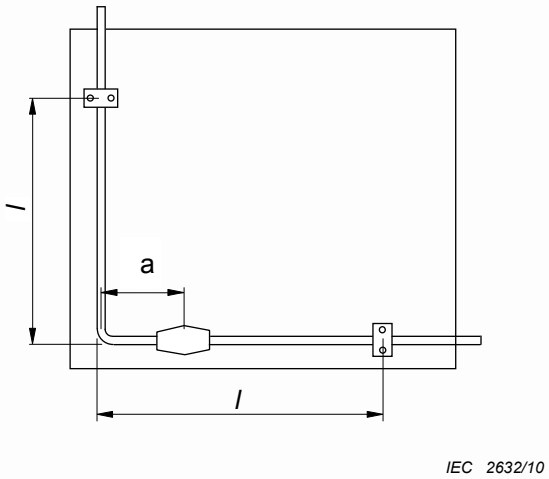


Figura D.1 – Arranjo geral de dois condutores para o cálculo da força eletrodinâmica

Um exemplo típico em um SPDA é o arranjo de condutores nos cantos simétricos, formando um ângulo de 90° um com o outro, com uma abraçadeira posicionada nas vizinhanças do canto, como mostrado na Figura D.2. O diagrama dos esforços para esta configuração é mostrado na Figura D.3. A força axial no condutor horizontal tende a puxar o condutor para fora da abraçadeira. O valor numérico da força ao longo do condutor horizontal, considerando o valor de pico da corrente de 100 kA e o comprimento do condutor vertical de 0,5 m, é mostrado na Figura D.4.



NOTA No exemplo em questão, a cota “a” mostra o local de uma eventual emenda capaz de suportar os esforços calculados neste ponto.

Figura D.2 – Arranjo de condutor típico em um SPDA

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

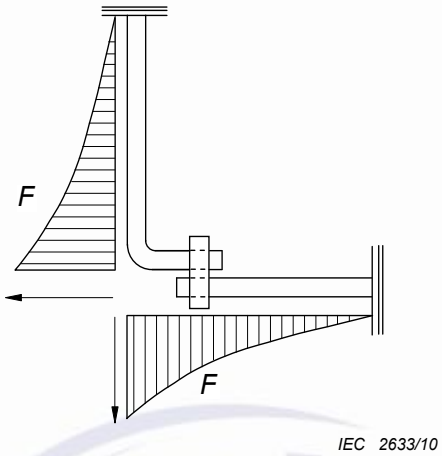
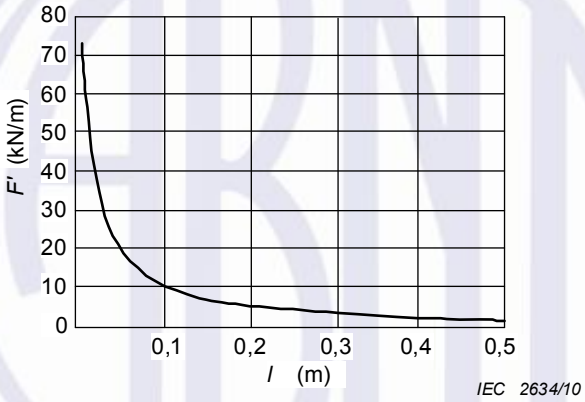


Figura D.3 – Diagrama de esforços *F* para a configuração da Figura D.2



NOTA Considerado o valor de pico de corrente de 100 kA e o comprimento do condutor vertical de 0,5 m.

Figura D.4 – Força por unidade de comprimento *F'* ao longo do condutor horizontal da Figura D.2

D.4.2.1.2 Efeitos das forças eletrodinâmicas

Em termos da amplitude da força aplicada, o valor instantâneo da força eletrodinâmica, $F(t)$, é proporcional ao quadrado da corrente instantânea $I(t)^2$. Em termos de desenvolvimento dos esforços na estrutura mecânica do SPDA, expresso pelo produto da deformação elástica $\delta(t)$ e a constante elástica k da estrutura do SPDA, os dois seguintes efeitos devem ser considerados. A frequência natural mecânica (associada ao comportamento elástico da estrutura do SPDA), e a deformação permanente da estrutura do SPDA (associada ao seu comportamento plástico) são os parâmetros mais importantes. Além disso, em muitos casos, o efeito das forças de atrito da estrutura é importante.

A amplitude das vibrações da estrutura elástica do SPDA causada pela força eletrodinâmica desenvolvida por uma corrente de descarga atmosférica pode ser avaliada por meios de equações diferenciais de segunda ordem, sendo que o fator-chave é a relação entre a duração do impulso de corrente e o período da oscilação mecânica natural da estrutura do SPDA. A condição típica encontrada em instalações de SPDA consiste em períodos de oscilação natural da estrutura muito maiores do que aqueles da força aplicada (duração do impulso de corrente da descarga atmosférica). Neste caso, os esforços mecânicos máximos ocorrem depois do término do impulso de corrente e têm um valor de pico que permanece mais baixo do que aquele da força aplicada, e podem, na maioria dos casos, ser desprezados.

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Uma deformação plástica ocorre quando os esforços de tensionamento excedem o limite elástico do material. Se o material que compõe a estrutura do SPDA é dúctil, como alumínio ou cobre recozido, as forças eletrodinâmicas podem deformar os condutores nos cantos e laços. Os componentes do SPDA devem, portanto, ser projetados para suportar estas forças e mostrar essencialmente um comportamento elástico.

O esforço mecânico total aplicado à estrutura do SPDA depende da integral no tempo da força aplicada e, portanto, da energia específica associada com o impulso de corrente, mas depende também da forma de onda do impulso de corrente e da sua duração (comparada com o período de oscilação natural da estrutura). Todos estes parâmetros devem, portanto, ser levados em conta durante os ensaios.

D.4.2.2 Danos devido às ondas de choque acústicas

Quando a corrente de uma descarga atmosférica flui por meio de um arco, uma onda de choque é produzida. A severidade do choque é dependente do valor de pico e da taxa de subida da corrente.

Em geral, os danos devido à onda de choque acústica são insignificantes nas partes metálicas do SPDA, mas podem causar danos nas proximidades.

D.4.3 Efeitos combinados

Na prática, ambos os efeitos, térmicos e mecânicos, ocorrem simultaneamente. Se o aquecimento do material dos componentes (hastes, grampos etc.) é suficiente para amolecer os materiais, danos muito maiores podem ocorrer. Em casos extremos, o condutor pode se fundir explosivamente e causar danos consideráveis nas proximidades da estrutura. Se a seção reta do metal é suficiente para suportar toda a ação seguramente, somente a integridade mecânica deve ser verificada.

D.4.4 Centelhamento

Em geral, o centelhamento é importante em ambientes inflamáveis ou na presença de materiais combustíveis. Para os componentes do SPDA, na maioria dos casos práticos, o centelhamento não é crítico.

Dois tipos diferentes de centelhamento podem ocorrer: centelhamento térmico e centelhamento por tensão. O centelhamento térmico ocorre quando uma corrente muito alta é forçada a passar por uma junção entre dois materiais condutores. A maioria dos centelhamentos térmicos ocorre perto das extremidades dentro de uma junção se a pressão da interface é bastante baixa; a causa primária é a alta densidade de corrente e a pressão inadequada da interface. A intensidade do centelhamento térmico é associada à energia específica e, portanto, a fase mais crítica da descarga atmosférica é a primeira descarga de retorno. O centelhamento por tensão ocorre quando a corrente é forçada a tomar caminhos curvos, por exemplo, dentro de uma junção, se a tensão induzida nestes laços exceder a tensão disruptiva entre as partes metálicas. A tensão induzida é proporcional à indutância própria multiplicada pela taxa de subida da corrente da descarga atmosférica. A componente mais crítica da descarga atmosférica para o centelhamento por tensão é, portanto, a descarga atmosférica subsequente negativa.

D.5 Componentes do SPDA, problemas relevantes e parâmetros de ensaios

D.5.1 Geral

Os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas são construídos por vários componentes diferentes, cada qual com uma função específica dentro do sistema. A natureza dos componentes e os esforços específicos aos quais eles estão sujeitos requerem considerações especiais no preparo de ensaios de laboratórios para verificar seus desempenhos.

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

D.5.2 Captação

Os efeitos no subsistema de captação surgem de ambos os efeitos: mecânicos e térmicos (como discutido a seguir, em D.5.3, mas deve ser notado que uma alta parcela da corrente da descarga atmosférica flui no condutor de captação atingido) e também, em alguns casos, efeitos de erosão de arcos, particularmente em componentes naturais de SPDA, como coberturas metálicas finas ou acabamentos metálicos de paredes (onde perfuração ou elevação de temperatura na superfície interna pode ocorrer) e condutores suspensos.

Para efeitos de erosão de arcos, dois parâmetros de ensaios principais devem ser considerados: a carga da componente longa da descarga atmosférica e sua duração.

A carga impõe a entrada de energia na região de contato do arco. Em particular, as descargas atmosféricas de longa duração mostram-se as mais severas para este efeito, enquanto que as descargas atmosféricas de curta duração podem ser desprezadas.

A duração da corrente tem um importante papel no fenômeno de transferência de calor para o material. A duração da corrente aplicada durante os ensaios deve ser comparável às das descargas atmosféricas de longa duração (0,5 s a 1 s).

D.5.3 Descidas

Os efeitos em condutores de descida causados pelas descargas atmosféricas podem ser divididos em duas categorias principais:

a) efeitos térmicos devido ao aquecimento resistivo;

b) efeitos mecânicos relacionados às interações magnéticas, onde a corrente da descarga atmosférica é dividida entre condutores posicionados próximos um do outro, ou quando há mudanças de direção da corrente (dobras ou conexões entre condutores posicionados em um dado ângulo, um em relação ao outro).

Na maioria dos casos, estes dois efeitos atuam independentemente um do outro, e ensaios de laboratório separados podem ser feitos para se verificar cada efeito. Esta aproximação pode ser adotada em todos os casos em que o aquecimento desenvolvido pela passagem da corrente das descargas atmosféricas não modifique substancialmente as características mecânicas.

D.5.3.1 Aquecimento resistivo

Cálculos e medições do aquecimento de condutores de diferentes seções retas e materiais causado pelo fluxo da corrente da descarga atmosférica têm sido publicados por vários autores. Os principais resultados em termos de curvas e formulas estão resumidos em D.4.1.1. Nenhum ensaio de laboratório é, portanto, necessário, em geral, para verificar o comportamento de um condutor sob o ponto de vista de elevação de temperatura.

Em todos os casos para os quais um ensaio de laboratório é requisitado, as seguintes considerações devem ser levadas em conta:

a) os parâmetros principais de ensaio a serem considerados são a energia específica e a duração da corrente de impulso;

b) a energia específica determina a elevação de temperatura devido ao aquecimento por efeito Joule causada pela passagem da corrente da descarga atmosférica. Valores numéricos a serem

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

considerados são aqueles relevantes à primeira descarga atmosférica. Dados conservativos são obtidos considerando-se descargas atmosféricas positivas;

c) a duração da corrente de impulso tem uma influência decisiva no processo de troca de calor com respeito ao ambiente ao redor do condutor considerado. Na maioria dos casos, a duração do impulso de corrente é tão curta que o processo de aquecimento pode ser considerado adiabático.

D.5.3.2 Efeitos mecânicos

Como discutido em D.4.2.1, as interações mecânicas são desenvolvidas entre condutores conduzindo a corrente da descarga atmosférica. A força é proporcional ao produto das correntes que fluem pelos condutores (ou ao quadrado da corrente se um condutor com dobra simples for considerado) e é inversamente proporcional à distância entre os condutores.

Uma situação usual, onde um efeito visível pode ocorrer, é quando um condutor forma um laço ou é dobrado. Quando este condutor conduz a corrente da descarga atmosférica, ele é submetido a uma força mecânica que tentará estender o laço e endireitar o canto e então dobrá-lo para fora. A magnitude desta força é proporcional ao quadrado da amplitude de corrente. Uma distinção clara deve ser feita, entretanto, entre a força eletrodinâmica, a qual é proporcional ao quadrado da amplitude da corrente, e o esforço correspondente que depende das características elásticas da estrutura mecânica do SPDA. Para estruturas do SPDA de frequências naturais relativamente baixas, o esforço desenvolvido dentro da estrutura do SPDA deve ser consideravelmente mais baixo que a força eletrodinâmica. Neste caso, nenhum ensaio de laboratório é necessário para verificar o comportamento de um condutor dobrado em um ângulo reto sob o ponto de vista mecânico, desde que as áreas das seções transversais prescritas nesta Norma sejam cumpridas.

Em todos os casos para os quais um ensaio de laboratório é requerido (especialmente para materiais dúcteis), as seguintes considerações devem ser levadas em consideração. Três parâmetros da primeira descarga atmosférica de retorno devem ser considerados: a duração, a energia específica da corrente de impulso e, no caso de sistemas rígidos, a amplitude da corrente.

A duração do impulso de corrente, comparado com o período da oscilação mecânica natural da estrutura do SPDA, determina o tipo de resposta mecânica do sistema em termos de deslocamento:

a) se a duração do impulso é muito menor que o período de oscilação mecânica natural da estrutura do SPDA (caso normal para estruturas de SPDA submetidas aos impulsos de descargas atmosféricas), a massa e a elasticidade do sistema impedem que a estrutura seja deslocada apreciavelmente, e o esforço mecânico relevante é essencialmente relacionado à energia específica do impulso de corrente. O valor de pico do impulso de corrente tem um efeito limitado;

b) se a duração do impulso é comparável ou maior que o período da oscilação mecânica natural da estrutura, o deslocamento do sistema é mais sensível à forma de onda do esforço aplicado: neste caso, o valor de pico do impulso de corrente e sua energia específica necessitam ser reproduzidos durante o ensaio.

A energia específica de um impulso de corrente determina o esforço que causa as deformações elástica e plástica da estrutura do SPDA. Os valores numéricos a serem considerados são aqueles relevantes à primeira componente da descarga atmosférica.

Os valores máximos do impulso de corrente determinam a extensão do deslocamento máximo da estrutura do SPDA, no caso de sistemas rígidos com alta frequência de oscilação natural. Os valores numéricos a serem considerados são aqueles pertinentes à primeira componente da descarga atmosférica.

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

D.5.3.3 Componentes de conexão

Os componentes de conexão entre condutores adjacentes de um SPDA são possíveis pontos fracos, térmicos e mecânicos, sujeitos a altíssimos esforços.

No caso de um conector instalado de maneira a fazer com que o condutor forme um ângulo reto, os efeitos principais dos esforços estão associados às forças mecânicas as quais tendem a endireitar o conjunto de condutores e vencer as forças de atrito entre os componentes de conexão e os condutores, tracionando as conexões, podendo, portanto, abri-las. É possível que ocorram arcos nos pontos de contato de diferentes partes. Além disto, o efeito de aquecimento causado pela concentração da corrente sobre pequenas superfícies de contato tem um efeito não desprezível.

Ensaios de laboratório têm mostrado que é difícil separar os efeitos um do outro, uma vez que uma complexa interação de efeitos se estabelece: a resistência mecânica é afetada pela fusão localizada da área de contato; deslocamentos relativos entre partes dos componentes de conexão promovem a ocorrência de arcos e a consequente geração de calor intenso.

Na ausência de um modelo válido, os ensaios de laboratório devem ser conduzidos de forma a representar o mais próximo possível os parâmetros adequados da corrente da descarga atmosférica nas situações mais críticas, isto é, os parâmetros da corrente da descarga atmosférica devem ser aplicados por meio de um único ensaio elétrico.

Três parâmetros devem ser considerados neste caso: o valor de pico, a energia específica e a duração do impulso de corrente.

Os valores máximos do impulso de corrente determinam a força máxima, ou a extensão do deslocamento máximo da estrutura do SPDA, se a força de tração eletrodinâmica exceder as forças de atrito. Os valores numéricos a serem considerados são aqueles pertinentes à primeira componente da descarga atmosférica. Dados conservativos são obtidos considerando-se as descargas atmosféricas positivas.

A energia específica de um impulso de corrente determina o aquecimento nas superfícies de contato, onde a corrente se concentra em áreas pequenas. Os valores numéricos a serem considerados são aqueles pertinentes a primeira componente da descarga atmosférica. Dados conservativos são obtidos considerando-se as descargas atmosféricas positivas.

A duração do impulso de corrente determina o deslocamento máximo da estrutura, depois que as forças de atrito são excedidas, e tem um importante papel no fenômeno de transferência de calor dentro do material.

D.5.3.4 Aterramento

Os problemas reais com eletrodos de aterramento são relacionados com corrosão química e danos mecânicos causados por outras forças que não as eletrodinâmicas. Em casos práticos, a erosão do eletrodo de aterramento na região de contato de arcos é de menor importância. Deve-se, portanto, considerar que, contrariamente à captação, um SPDA típico tem vários componentes em contato com a terra, e a corrente de da descarga atmosférica é dividida entre vários eletrodos, causando assim efeitos menos importantes associados a arcos. Dois parâmetros de ensaios principais devem ser considerados neste caso:

a) a carga determina a entrada de energia na região de contato do arco. Em particular, a contribuição da primeira descarga atmosférica pode ser desprezada, uma vez que descargas de longa duração apresentam-se como mais severas para este subsistema;

b) a duração do impulso de corrente tem um papel importante no fenômeno de transferência de calor para o material. A duração dos impulsos de corrente aplicados durante os ensaios deve ser comparável às durações das descargas atmosféricas de longa duração (0,5 s a 1 s).

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

D.6 Dispositivo de proteção contra surtos (DPS)

D.6.1 Geral

Os efeitos dos esforços em um DPS causados pelas descargas atmosféricas dependem do tipo de DPS considerado, com atenção especial à presença ou ausência de um centelhador.

D.6.2 DPS contendo centelhadores

Os efeitos em centelhadores causados pelas descargas atmosféricas podem ser divididos em duas categorias importantes:

a) a erosão dos eletrodos dos centelhadores por aquecimento, fusão e vaporização do material;

b) os esforços mecânicos causados pela onda de choque da descarga atmosférica.

É extremamente difícil investigar estes efeitos separadamente, uma vez que ambos são relacionados com os principais parâmetros da corrente da descarga atmosférica por meio de relações complexas.

Para centelhadores, os ensaios de laboratório devem ser conduzidos de maneira que representem o mais próximo possível, os parâmetros da corrente das descargas atmosféricas na situação mais crítica, isto é, todos os parâmetros adequados da corrente da descarga devem ser aplicados por meio de um estresse elétrico único.

Cinco parâmetros devem ser considerados neste caso: o valor de pico, a carga, a duração, a energia específica e a taxa de subida do impulso de corrente.

O valor de pico de corrente determina a severidade da onda de choque. Os valores numéricos a serem considerados são aqueles pertinentes à primeira componente da descarga atmosférica. Dados conservativos são obtidos considerando-se as descargas atmosféricas positivas.

A carga determina a entrada de energia no arco. A energia do arco vai aquecer, fundir e possivelmente vaporizar parte do material do eletrodo no ponto de contato do arco. Os valores numéricos a serem considerados são aqueles pertinentes à descarga atmosférica completa. Entretanto, a carga da componente de longa duração da corrente pode ser desprezada em muitos casos, dependendo da configuração do sistema de fornecimento de energia (TN, TT ou IT).

A duração do impulso de corrente controla o fenômeno de transferência de calor para a massa do eletrodo e a consequente propagação da frente de onda de fusão.

A energia específica do impulso de corrente determina a autocompressão magnética do arco e a física dos jatos de plasma no eletrodo, desenvolvidos na interface entre a superfície do eletrodo e o arco (os quais podem expelir uma significante quantidade de material fundido). Os valores numéricos a serem considerados são aqueles pertinentes à primeira componente da descarga atmosférica. Dados conservativos são obtidos considerando-se as descargas atmosféricas positivas.

NOTA Para centelhadores utilizados em sistemas de fornecimento de energia, a possível amplitude da corrente subsequente à frequência industrial constitui um importante fator de estresse, e recomenda-se, por sua vez, que seja levado em consideração.

D.6.3 DPS contendo varistores de óxido metálico

O esforço nos varistores de óxido metálico causados pelas descargas atmosféricas pode ser dividido em duas categorias principais: sobrecarga e descarga disruptiva. Cada categoria é caracterizada pelos modos de falha gerados por diferentes fenômenos e dominados por diferentes parâmetros. A

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

falha de um DPS de óxido metálico é relacionada com as suas características mais fracas, sendo, portanto, improvável que ocorra uma sinergia entre diferentes esforços danosos. É, portanto, aceitável realizar ensaios separados para verificar o comportamento em cada condição de falha.

Sobrecargas são causadas por uma quantidade de energia absorvida que excede a capacidade do dispositivo. O excesso de energia considerado aqui é relacionado aos próprios esforços impostos pela descarga atmosférica. Entretanto, para DPS conectado aos sistemas de fornecimento de energia, a corrente subsequente injetada no dispositivo pelo sistema de potência imediatamente após a passagem da corrente da descarga atmosférica pode também apresentar um importante papel nos danos fatais do DPS. Finalmente, um DPS pode ser fatalmente danificado pela instabilidade térmica sob a tensão aplicada relativa ao coeficiente de temperatura negativo das características volt-ampère dos resistores. Para a simulação de sobrecarga de varistores de óxido metálico, o parâmetro principal a ser considerado é a carga.

A carga determina a entrada de energia no bloco do resistor de óxido-metálico, considerando a tensão residual do bloco do resistor de óxido-metálico uma constante. Os valores numéricos a serem considerados são aqueles relevantes à descarga atmosférica.

Descargas disruptivas e trincas são causadas pela amplitude dos impulsos de corrente que excedem as capacidades dos resistores. O modo de falha é geralmente evidenciado por uma descarga disruptiva externa sobre a isolação do bloco, algumas vezes penetrando no interior do bloco resistor e causando uma trinca ou uma cavidade perpendicular à superfície da isolação do bloco. A falha é principalmente relacionada com o colapso das propriedades dielétricas da isolação do bloco resistor.

Para a simulação do fenômeno da descarga atmosférica, dois parâmetros principais devem ser considerados: o valor máximo e a duração do impulso de corrente.

O valor máximo do impulso de corrente determina, por meio do nível de tensão residual correspondente, se o esforço dielétrico máximo na isolação do resistor é excedido. Os valores numéricos a serem considerados são aqueles pertinentes à primeira componente da descarga atmosférica. Dados conservativos são obtidos considerando-se as descargas atmosféricas positivas.

A duração dos impulsos de corrente determina a duração da aplicação dos esforços dielétricos na isolação do resistor.

D.7 Resumo dos parâmetros de ensaios a serem adotados nos ensaios de componentes de SPDA

A Tabela D.1 resume os aspectos mais críticos de cada componente do SPDA durante o desempenho da sua função e fornece os parâmetros da corrente da descarga atmosférica a serem reproduzidos em ensaios de laboratório.

Os valores numéricos dados na Tabela D.1 são pertinentes aos parâmetros das descargas atmosféricas de importância no ponto de impacto.

Os valores de ensaios devem ser calculados considerando a distribuição da corrente a qual pode ser expressa por meio de um fator de distribuição de corrente, como apresentado em D.3.

Os valores numéricos dos parâmetros a serem utilizados durante os ensaios podem, portanto, ser calculados com base nos dados fornecidos na Tabela D.1, aplicando-se os fatores de redução relacionados com a distribuição de corrente, como expresso pelas fórmulas descritas em D.3.

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Anexo E
(informativo)

Surtos devido às descargas atmosféricas em diferentes pontos da instalação

E.1 Visão geral

Recomenda-se que, para o dimensionamento de condutores, DPS e aparelhos, a intensidade dos surtos em um ponto particular da instalação seja determinada. Os surtos podem surgir das correntes das descargas atmosféricas (parcialmente) e dos efeitos de indução dos laços da instalação. Recomenda-se que o nível de surto seja menor do que o nível de suportabilidade dos componentes utilizados (definidos por ensaios adequados conforme necessário).

E.2 Surtos devido às descargas atmosféricas na estrutura (fonte de danos S1)

E.2.1 Surtos fluindo por meio de partes condutoras externas e linhas conectadas à estrutura

A corrente da descarga atmosférica, quando conduzida para terra, é dividida entre o sistema de aterramento, as partes condutoras externas e as linhas externas, diretamente ou por meio de DPS conectados a elas.

Se $I_F = k_e \times I$ (E.1)

é a parte da corrente da descarga atmosférica pertinente a cada parte condutora ou linha externa, então o fator de divisão da corrente k_e depende de:

a) o número de caminhos paralelos;

b) suas impedâncias convencionais de aterramento para as partes enterradas ou suas resistências de aterramento para as partes aéreas, onde estas partes se conectem com outras partes enterradas;

c) a impedância convencional de aterramento do subsistema de aterramento.

Para instalação enterrada:

$$k_e = \frac{Z}{Z_1 + Z \times \left(n_1 + n_2 \times \frac{Z_1}{Z_2} \right)} \quad \text{(E.2)}$$

Para instalação aérea:

$$k_e = \frac{Z}{Z_2 + Z \times \left(n_2 + n_1 \times \frac{Z_2}{Z_1} \right)} \quad \text{(E.3)}$$

onde

Z é a impedância convencional de aterramento do subsistema de aterramento;

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Z_1 é a impedância convencional de aterramento das partes externas ou linhas externas (Tabela E.1) instaladas enterradas;

Z_2 é a resistência de terra do arranjo de aterramento que conecta a linha aérea à terra. Se a resistência de terra do ponto de aterramento não for conhecida, o valor de Z_1 pode ser utilizado (observando, na Tabela E.1, a resistividade do solo no ponto de aterramento).

NOTA 1 Assume-se que o valor de k_e é o mesmo em cada ponto de aterramento. Se este não for o caso, recomenda-se que sejam utilizadas equações mais complexas.

n_1 é o número total de partes externas ou linhas enterradas;

n_2 é o número total de partes externas ou linhas aéreas;

I é a corrente da descarga atmosférica pertinente ao nível de proteção (NP) considerado.

Assumindo, como uma primeira aproximação, que metade da corrente da descarga atmosférica flui no subsistema de aterramento e que $Z_2 = Z_1$, o valor de k_e pode ser estimado para uma parte condutora externa ou linha externa por:

$$k_e = 0{,}5 / (n_1 + n_2) \quad \text{(E.4)}$$

Se as linhas que adentram a estrutura (por exemplo, linhas elétricas e de sinal) não são blindadas ou não estão instaladas em condutos metálicos, cada condutor da linha conduz uma parte igual da corrente da descarga atmosférica.

$$k'_e = k_e / n' \quad \text{(E.5)}$$

sendo n' o número total de condutores.

Para linhas blindadas e interligadas na entrada, os valores do fator de divisão de corrente k'_e para cada condutor de uma linha blindada são dados por:

$$k'_e = k_e \times R_S / (n' \times R_S + R_C) \quad \text{(E.6)}$$

onde

R_S é a resistência ôhmica por unidade de comprimento da blindagem;

R_C é a resistência ôhmica por unidade de comprimento do condutor interno.

NOTA 2 Esta fórmula pode subestimar o papel da blindagem no desvio da corrente da descarga atmosférica devido à indutância mútua entre o condutor interno e a blindagem.

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Tabela E.1 – Valores de impedâncias convencionais de aterramento *Z* e Z_1 de acordo com a resistividade do solo

ρ Ωm	Z_1[a] Ω	Impedância convencional de aterramento relativa ao tipo de SPDA[b] Z Ω		
		I	II	III – IV
≤ 100	8	4	4	4
200	11	6	6	6
500	16	10	10	10
1 000	22	10	15	20
2 000	28	10	15	40
3 000	35	10	15	60

NOTA Os valores apresentados nesta tabela se referem à impedância convencional de aterramento de um condutor enterrado sob condição de impulso (10/350 μs).

[a] Valores referidos a partes externas com comprimento acima de 100 m. Para comprimentos de partes externas inferiores a 100 m em solos de alta resistividade (> 500 Ωm), os valores de Z_1 podem ser o dobro.

[b] Subsistema de aterramento conforme a ABNT NBR 5419-3:2015, 5.4.

E.2.2 Fatores que influenciam a divisão da corrente da descarga atmosférica em linhas de energia

Para cálculos detalhados, vários fatores podem influenciar a amplitude e a forma dos surtos:

a) o comprimento do cabo pode influenciar a divisão da corrente e as características da forma de onda devido à relação *L/R*;

b) diferentes impedâncias de condutores de neutro e fase podem influenciar a divisão da corrente ao longo dos condutores da linha;

NOTA 1 Por exemplo, se o condutor neutro (N) tem múltiplos aterramentos, a menor impedância do N comparada com os condutores de fases L1, L2, e L3 pode resultar em 50 % da corrente fluindo por meio do condutor N com os 50 % restantes sendo dividido pelos outros três condutores de fase (17 % cada). Se N, L1, L2, e L3 possuem a mesma impedância, cada condutor irá conduzir aproximadamente 25 % da corrente.

c) diferentes impedâncias de transformador podem influenciar a divisão de corrente (este efeito pode ser desprezado se o transformador for protegido por DPS que curto-circuita a sua impedância);

d) a relação entre as resistências convencionais de aterramento do transformador e dos itens do lado da carga pode influenciar a divisão de corrente (quanto menor a impedância do transformador, maior será o surto de corrente fluindo para o sistema de alimentação de baixa tensão);

e) consumidores em paralelo causam uma redução da impedância efetiva do sistema de alimentação de baixa tensão; isto pode aumentar a parcela da corrente da descarga atmosférica que flui para este sistema.

NOTA 2 Ver ABNT NBR 5419-4:2015, Anexo D, para maiores informações.

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

E.3 Surtos pertinentes às linhas conectadas à estrutura

E.3.1 Surtos devido às descargas atmosféricas nas linhas (fonte de danos S3)

Para descargas atmosféricas diretas nas linhas conectadas, a divisão da corrente da descarga atmosférica em ambas as direções da linha e a ruptura da isolação devem ser levadas em conta.

A seleção do valor de I_{imp} pode ser baseada nos valores dados nas Tabelas E.2 e E.3, para sistemas de baixa tensão, e Tabela E.3, para sistemas de sinais, onde os valores preferenciais de I_{imp} são associados com o nível de proteção (NP).

Tabela E.2 – Surtos de correntes devido às descargas atmosféricas previstos em sistemas de baixa tensão

NP (classe)	Sistemas de baixa tensão			
	Descargas atmosféricas diretas e indiretas na linha		Descargas atmosféricas perto da estrutura[a]	Descargas atmosféricas na estrutura[a]
	Fonte de danos S3 (descarga atmosférica direta)[b] Forma de onda da corrente: 10/350 µs kA	Fonte de danos S4 (descarga atmosférica indireta)[c] Forma de onda da corrente: 8/20 µs kA	Fonte de danos S2 (corrente induzida) Forma de onda da corrente: 8/20 µs kA	Fonte de danos S1 (corrente induzida) Forma de onda da corrente:[d] 8/20 µs kA
III - IV	5	2,5	0,1	5
II	7,5	3,75	0,15	7,5
I	10	5	0,2	10

NOTA Todos os valores referidos a cada condutor da linha.

a O roteamento do laço dos condutores e a distância da corrente indutora afetam os valores dos surtos de corrente previstos. Os valores da Tabela E.2 referem-se a laço fechado de condutores não blindados e com diferentes roteamentos em grandes edifícios (áreas de laços da ordem de 50 m^2, largura = 5 m), a 1 m da parede, dentro de uma estrutura não blindada ou edifício com SPDA (k_c = 0,5). Para outras características de laço e de estrutura, os valores podem ser multiplicados pelos fatores K_{S1}, K_{S2}, K_{S3} (ver ABNT NBR 5419-2:2015, B.4).

b Valores pertinentes ao caso onde a descarga atmosférica atinge o último poste da linha perto do consumidor e linha de vários condutores (três fases + neutro).

c Valores referidos a linhas aéreas. Para linhas enterradas, os valores podem ser a metade.

d A resistência e a indutância do laço afetam a forma de onda da corrente induzida. Onde a resistência do laço for desprezível, a forma de onda 10/350 µs pode ser assumida. Este é o caso onde um DPS do tipo de chaveamento é instalado no circuito induzido.

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Tabela E.3 – Surtos de correntes devido às descargas atmosféricas previstos em sistemas de sinais

NP (classe)	Sistemas de sinais[a]			
	Descargas atmosféricas diretas e indiretas na linha		Descargas atmosféricas perto da estrutura[b]	Descargas atmosféricas na estrutura[b]
	Fonte de danos S3 (descarga atmosférica direta)[c] Forma de onda da corrente: 10/350 µs kA	Fonte de danos S4 (descarga atmosférica indireta)[d] Forma de onda da corrente: 8/20 µs kA	Fonte de danos S2 (corrente induzida) Forma de onda da corrente: 8/20 µs kA	Fonte de danos S1 (corrente induzida) Forma de onda da corrente: 8/20 µs kA
III - IV	1	0,035	0,1	5
II	1,5	0,085	0,15	7,5
I	2	0,16	0,2	10

NOTA Todos os valores referidos a cada condutor da linha.

a Ver recomendação K.67 do ITU-T[19] para mais informações.

b O roteamento do laço dos condutores e a distância da corrente indutora afetam os valores dos surtos de corrente previstos. Os valores da Tabela E.3 referem-se a laço fechado de condutores não blindados e com diferentes roteamentos em grandes edifícios (áreas de laços da ordem de 50 m^2, largura = 5 m), a 1 m da parede da estrutura, dentro de uma estrutura não blindada ou edifício com SPDA ($k_c = 0,5$). Para outras características de laço e de estrutura, os valores podem ser multiplicados pelos fatores K_{S1}, K_{S2}, K_{S3} (ver ABNT NBR 5419-2:2015, B.4).

c Valores referidos a linhas não blindadas com muitos pares. Para fios externos não blindados (fio "*drop*"), os valores podem ser cinco vezes maiores.

d Valores referidos a linhas aéreas não blindadas. Para linhas enterradas, os valores podem ser a metade.

Para linhas blindadas, os valores das sobrecorrentes dados na Tabela E.2 podem ser reduzidos por um fator de 0,5.

NOTA Assume-se que a resistência da blindagem é aproximadamente igual à resistência de todos os condutores da linha em paralelo.

E.3.2 Surtos devido às descargas atmosféricas próximas às linhas (fonte de danos S4)

Os surtos das descargas atmosféricas próximas às linhas possuem energias muito menores do que aqueles associadas às descargas atmosféricas diretas na linha (fonte de danos S3).

As sobrecorrentes previstas, associadas a um nível de proteção (NP) específico, são dadas nas Tabelas E.2 e E.3.

Para linhas blindadas, os valores de sobrecorrentes dados nas Tabelas E.2 e E.3 podem ser reduzidos por um fator 0,5.

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

E.4 Surtos devido aos efeitos de indução (fontes de danos S1 ou S2)

E.4.1 Geral

Surtos devido aos efeitos de indução de campos magnéticos gerados pelas descargas atmosféricas nas imediações (fonte S2), ou da corrente da descarga atmosférica fluindo no SPDA externo ou em uma blindagem espacial da ZPR 1 (fonte S1), têm uma forma de onda de corrente tipicamente de 8/20 µs. Estes surtos devem ser considerados próximos de ou no terminal do dispositivo dentro da ZPR 1 e na interface das ZPR 1/2.

E.4.2 Surtos dentro de uma ZPR 1 não blindada

Dentro de uma ZPR 1 não blindada (por exemplo, protegida somente por um SPDA externo de acordo com a ABNT NBR 5419-3 com uma largura de malha maior que 5 m), surtos de intensidades relativamente altas são previstos devido aos efeitos de indução dos campos magnéticos não amortecidos.

As sobrecorrentes previstas, associadas aos níveis de proteção (NP), são fornecidas nas Tabelas E.2 e E.3.

E.4.3 Surtos dentro de ZPR blindadas

Dentro de ZPR com blindagem espacial efetiva (o que requer largura de malha abaixo de 5 m de acordo com a ABNT NBR 5419-4:2015, Anexo A, a geração de surtos devido aos efeitos de indução dos campos magnéticos é fortemente reduzida. Nestes casos, os surtos são muito menores do que aqueles dados em E.4.2.

Dentro da ZPR 1 os efeitos de indução são menores devido ao efeito de amortecimento da sua blindagem espacial.

Dentro da ZPR 2 os surtos são ainda mais reduzidos devido ao efeito cascata de ambas as blindagens espaciais de ZPR 1 e ZPR 2.

E.5 Informações gerais relativas aos DPS

O uso de DPS depende da sua capacidade de suportabilidade, classificada na ABNT NBR IEC 61643-1, para sistemas de energia, e na IEC 61643-21, para sistemas de sinais.

Os DPS a serem utilizados de acordo com as suas posições na instalação são como a seguir:

a) no ponto de entrada da linha na estrutura (na periferia da ZPR 1, por exemplo, no quadro de distribuição principal):

   — DPS ensaiado com I_{imp} (forma de onda de corrente típica 10/350), por exemplo, DPS ensaiado de acordo com a classe I;

   — DPS ensaiado com I_n (forma de onda de corrente típica 8/20), por exemplo, DPS ensaiado de acordo com a classe II.

b) perto do dispositivo a ser protegido (na periferia da ZPR 2 e superior, por exemplo, no quadro de distribuição secundário ou em uma tomada):

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

— DPS ensaiado com I_{imp} (forma de onda de corrente típica 10/350), por exemplo, DPS ensaiado de acordo com a classe I para DPS de potência;

— DPS ensaiado com I_n (forma de onda de corrente típica 8/20), por exemplo, DPS ensaiado de acordo com a classe II;

— DPS ensaiado com a onda combinada (corrente típica forma de onda de corrente 8/20), por exemplo, DPS ensaiado de acordo com a classe III.

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Bibliografia

[1] ABNT NBR 5410, *Instalações elétricas de baixa tensão*

[2] ABNT NBR 6323, *Galvanização de produtos de aço ou ferro fundido – Especificação*

[3] ABNT NBR 13571, *Haste de aterramento aço-cobreado e acessórios*

[4] ABNT NBR 15749, *Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento*

[5] ABNT NBR IEC 60079-10-1, *Atmosferas explosivas – Parte 10-1: Classificação de áreas – Atmosferas explosivas de gás*

[6] ABNT NBR IEC 60079-10-2, *Atmosferas explosivas – Parte 10-2: Classificação de áreas – Atmosferas de poeiras combustíveis*

[7] ABNT NBR IEC 60079-14, Atmosferas explosivas – Parte 14: Projeto, seleção e montagem de instalações elétricas

[8] ABNT NBR IEC 61643-1, *Dispositivos de proteção contra surtos em baixa tensão – Parte 1: Dispositivos de proteção conectados a sistemas de distribuição de energia de baixa tensão – Requisitos de desempenho e métodos de ensaio*

[9] IEC 60364 (all parts), *Low-voltage electrical installations*

[10] IEC/TS 60479 (all parts), *Effects of current on human beings and livestock*

[11] IEC 60664-1, *Insulation coordination for equipment within low-voltage systems – Part 1: Principles, requirements and tests*

[12] IEC 61000-4-5, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-5: Testing and measurement techniques – Surge immunity test*

[13] IEC 61400-24, *Wind turbines – Part 24: Lightning protection*

[14] IEC 61557-4, *Electrical safety in low-voltage distribution systems up to 1 000 V a.c. and 1 500 V d.c. – Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures – Part 4: Resistance of earth connection and equipotential bonding*

[15] IEC 61643-12, *Low-voltage surge protective devices – Part 12: Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems – Selection and application principles*

[16] IEC 61643-21, *Low-voltage surge protective devices – Part 21: Surge protective devices connected to telecommunications and signalling networks – Performance requirements and testing methods*

[17] IEC 62305 (all parts), *Protection against lightning*

[18] IEC 62561(all parts), *Lightning protection system components (LPSC)*

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

[19] ITU-T Recommendation K.67*, Expected surges on telecommunications and signalling networks due to lightning*

[20] BERGER K., ANDERSON R.B., KRÖNINGER H., Parameters of lightning flashes. CIGRE Electra No 41 (1975), p. 23 – 37

[21] ANDERSON R.B., ERIKSSON A.J., Lightning parameters for engineering application. CIGRE Electra No 69 (1980), p. 65 – 102

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:12:19 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2015 - Todos os direitos reservados